EL UNIVERSO

ENCICLOPEDIA DE LA ASTRONOMÍA Y EL ESPACIO

EL UNIVERSO

ENCICLOPEDIA DE LA ASTRONOMÍA Y EL ESPACIO

Volumen



PLANETA DeAGOSTINI

EL UNIVERSO

ENCICLOPEDIA DE LA ASTRONOMÍA Y EL ESPACIO

17



PLANETA DeAGOSTINI



COMPOSICIÓN DE LA OBRA

Volumen 1	Fascículos 1	al	16
Volumen 2	Fascículos 17	al	32
Volumen 3	Fascículos 33	al	48
Volumen 4	Fascículos 49	al	64
Volumen 5	Fascículos 65	al	80

VENTA EN QUIOSCOS O LIBRERÍAS

Pida a su proveedor habitual que le reserve un ejemplar de **EL UNIVERSO.** Adquiriéndolo todas las semanas en el mismo quiosco o librería facilitará la distribución y obtendrá un mejor servicio.
Las tapas correspondientes a cada volumen se ponen a la venta con el fascículo que cierra el tomo. Con dicho fascículo se entregan las portadillas correspondientes.

Edita: Editorial Planeta-DeAgostini, S.A., Barcelona

Presidente: José Manuel Lara
Director General: Carlos Fernández
Director Editorial: Virgilio Ortega
Director General de Producción: Félix García
Coordinador General: Carles Dorico

Realización: R.B.A., Realizaciones Editoriales, S.L.
Edición: Carmen de Celis
Asesor: Jordi José Pont
Redactores y colaboradores: Joan Pericay, Jaume Gavaldá
Diagramación: Carles Gené

Redacción y administración: Aribau, 185, 1° - 08021 Barcelona

ISBN Obra completa (con vídeo): 84-395-4148-1
Obra completa (sin vídeo): 84-395-4138-4
Fascículos (con vídeo): 84-395-4149-X
Fascículos (sin vídeo): 84-395-4139-2
Depósito legal: B-47.097-1997

Impresión: Gráficas Estella, S.A., Estella, Navarra.
Impreso en España - Printed in Spain

Los editores se reservan el derecho de modificar el precio de venta de los componentes de la colección en el transcurso de la misma, si las circunstancias así lo exigieran.

Distribuye para España: Marco Ibérica Distribución de Ediciones, S.A.
Carretera de Irún, Km 13,350, variante de Fuencarral
28034 Madrid

Los editores garantizan la publicación de todos los fascículos que componen esta obra.

Servicio de atención al cliente: Tel. 902 10 13 24*
Suscripciones (sólo para España):
Apartado de correos n.° 93.103, 08080 - Barcelona
Tel. 902 11 45 59*

El P.V.P. en Canarias, Ceuta y Melilla incluye los gastos de transporte.

Fotografías: I.G.D.A.: cubierta, 1, 2-3, 3ar.der., 4ar.der., 5ar.izq., 5ar.der., 11ab.izq., 14-15, 18ab.der., 19ar.izq., 19ar.der.; Carlo Colombo: 6-7; ESA/I.G.D.A.: 18ar.der., 19ab.der., 20ar.izq., 20c.der., 20ab.der.
Dibujos: Daniele Festa: 2ab.izq., 4ab.der., 5ab., 7ab., 8ar., 8ab.izq., 9c.izq., 9ab.izq., 10ar.izq., 10ar.der., 10c., 11ab.der., 14ab.izq., 15ar.der., 16c.izq., 16ab.izq., 16ab.c., 16ab.der., 17ab.izq., 17ab.der.; DI.DO.t: 13; Osservatorio Astronomico Brera: 12 ar.der.

PETICIÓN DE FASCÍCULOS ATRASADOS

Válido sólo para el territorio español y para no suscriptores.

Si desea recibir algún fascículo atrasado o tapas, rellene en LETRAS MAYÚSCULAS este boletín y envíelo a:
PLANETA-DeAGOSTINI, Apartado de Correos N.° 2.867 - 08080 Barcelona, o llame al Tel. **902 288 288***

DATOS PERSONALES:

APELLIDOS

NOMBRE

CALLE O PLAZA

N.° PISO PUERTA ESC.

CÓDIGO POSTAL POBLACIÓN

PROVINCIA EDAD

TELÉFONO PROFESIÓN

FIRMA (Imprescindible)

• Recibirá contrarreembolso, más gastos de envío todo el material que nos haya solicitado.

SOLICITUD:



Indique los números de los fascículos atrasados que desea recibir:

N.° de tapas que solicita:

Indique si desea recibir la versión con vídeo o sin vídeo:

Con vídeo ☐ Sin vídeo ☐

• Planeta-DeAgostini mantendrá su servicio de petición de atrasados hasta un plazo máximo de 18 meses a partir de la fecha de venta de cada uno de los números que forman la colección.



EL SISTEMA TOLEMAICO Y EL SISTEMA COPERNICANO

El modelo heliocéntrico desarrollado por Copérnico entre los siglos XV y XVI provocó una revolución no sólo de carácter cultural, sino también científico. Con él se derrumbaba el concepto que había colocado al hombre (y a la Tierra) en el centro del universo.

Copérnico, Tycho Brahe, Kepler, Galileo y Newton fueron los protagonistas de la revolución científica que se produjo entre la mitad del siglo XVI y finales del siglo XVII. En aquel tiempo, no sólo cambió el concepto que se tenía del sistema solar, sino también la visión del mundo y de la posición del hombre en el cosmos. Con la revolución copernicana, la Tierra, y con ella el hombre, perdieron su posición en el centro del universo.

Un antiguo dibujo que representa un sextante astronómico, de Astronomiae Instauratae Mechanica, *de Tycho Brahe.*

LAS TEORÍAS ANTERIORES

En la cultura de la época en que vivió Copérnico (1473-1543) existían dos concepciones del universo por entonces conocido. Una se basaba en el sistema que se había consolidado con Aristóteles y que se conocía con el nombre de sistema de las esféricas homocéntricas. El otro, el sistema de los excéntricos y de los epiciclos, había sido desarrollado por Hiparco (190-120 a.C.) y mejorado posteriormente por Tolomeo (100-178), de quien tomaría el nombre de sistema tolemaico.

El cosmos entonces conocido estaba formado por la Luna, el Sol y los cinco planetas: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno. Las estrellas se



En este grabado se representa a Tolomeo llevando en la mano un instrumento astronómico, asistido por la musa de la Astronomía.

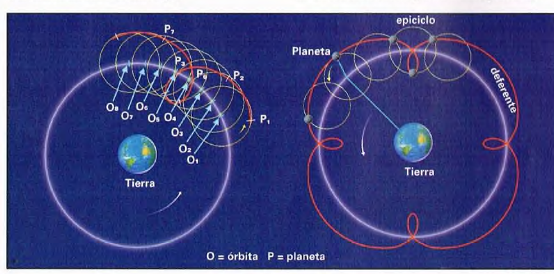
consideraban como el fondo natural sobre el cual se desarrollaban los movimientos de los planetas. Se había observado que estos movimientos no eran regulares, sino que, en algunos períodos del año, un planeta disminuía la velocidad de su movimiento en el firmamento hasta detenerse; volvía luego sobre sus pasos (movimiento retrógrado), se detenía de nuevo y, por fin, reemprendía el movimiento directo. El deseo de explicar esta anomalía aparente fue uno de los motivos que provocaron el desarrollo de los modelos del sistema solar.

En el sistema de las esferas homocéntricas, el cosmos se encerraba dentro de la esfera de las estrellas fijas. El movimiento diurno de las estrellas se explicaba mediante la rotación de esta esfera alrededor de su propio eje con una velocidad uniforme. El Sol y los diversos planetas eran transportados por un sistema de esferas que tenían una consistencia material. Estas esferas eran concéntricas (u homocéntricas) a la esfera de las estrellas fijas. El movimiento de los planetas se explicaba por el hecho de que cada una de las esferas giraba alrededor de su propio eje (inclinado de manera diferente, según el planeta) y con velocidades angulares distintas.

EL GEOCENTRISMO TOLEMAICO

El sistema tolemaico era también un modelo geocéntrico en el cual los planetas se imaginaban, asimismo, como cuerpos sostenidos por esferas materiales. Sin embargo, el intento de dar una explicación al movimiento retrógrado de los planetas propició la introducción de otras esferas materiales: en el sistema tolemaico cada uno de los planetas se mueve siguiendo las circunferencias de unos círculos llamados epiciclos, cuyos centros, a su vez, giran alrededor de círculos mayores llamados deferentes. El centro del deferente no coincidía con el centro de la Tierra, sino que estaba ligeramente desplazado respecto a este último, de tal modo que justificaba el hecho de que los planetas parecen moverse más rápidamente cuando se hallan más próximos a la Tierra.

Los sistemas aristotélico y tolemaico tenían en común algunas ideas fundamentales, como el hecho de que la Tierra ocupa, inmóvil, el centro del cosmos y que el movimiento natural de los planetas es circular uniforme.



A la izquierda, en el sistema tolemaico, un planeta se mueve siguiendo una circunferencia, llamada epiciclo, cuyo centro, a su vez, se mueve siguiendo otra circunferencia mayor, llamada deferente. El centro de esta última circunferencia está ligeramente desplazado respecto al centro de la Tierra. Con este sistema de esferas giratorias, es posible explicar el movimiento retrógrado de un planeta.



EL UNIVERSO SEGÚN ARISTÓTELES

El filósofo Aristóteles (384-322 a.C.) elaboró una concepción del cosmos centrada en la Tierra. Fue considerada válida por todos los estudiosos que le sucedieron, entre ellos el propio Tolomeo.

Arriba, un dibujo actual que representa el concepto aristotélico del universo.

LA TEORÍA HELIOCÉNTRICA

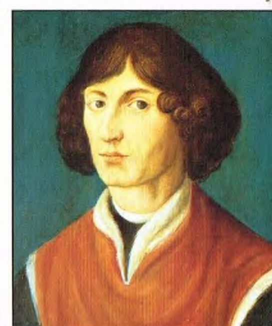
A pesar de que el sistema tolemaico ha sido superado, hay que atribuir a su autor un gran mérito: el de considerar que los fenómenos naturales, pese a toda su complejidad, pueden expresarse matemáticamente, lo cual permite prever su futuro. Tolomeo demostró por primera vez que era posible convertir los datos observados con la contemplación de los planetas en parámetros numéricos de las posiciones de los astros, considerados en un instante determinado. Posteriormente, en su intento de explicar las anomalías aparentes y las irregularidades de los movimientos de los planetas, Copérnico desarrolló un sistema en el cual era el Sol el que permanecía fijo en el centro del cosmos, mientras la Tierra giraba alrededor de él. Con la introducción del movimiento de revolución de la Tierra, el movimiento retrógrado de los planetas encontraba una explicación mucho más sencilla que con el sistema tolemaico.

En el sistema de Copérnico, la Tierra giraba alrededor del Sol según una órbita interna a la de Marte. Como la Tierra recorre su órbita más velozmente que Marte, habrá un período del año en el que la Tierra sobrepase a este planeta. Por tanto, Marte parecerá detenerse en el firmamento y, sin más, moverse hacia atrás. Es el mismo fenómeno aparente que se observa cuando adelantamos a un automóvil: parecerá que se mueve hacia atrás, pero no porque lo haga realmente, sino porque se mueve con menos rapidez que nosotros.

Ya antes de Copérnico, algunos pensadores de la Antigüedad, por ejemplo Aristarco y la escuela pitagórica, habían imaginado un cosmos heliocéntrico, pero esta idea no tuvo consecuencias a causa de la concepción dominante del mundo.

INNOVACIÓN, TRADICIÓN

Copérnico expuso su sistema en la obra *De revolutionibus orbium caelestium*, que apareció en 1543. Sin embargo, el sistema copernicano, aunque innovador, mantenía algunos aspectos que lo ligaban todavía a la tradición. Por ejemplo, según Copérnico, los planetas se movían porque eran transportados por esferas materiales en rotación. Además, todavía se pensaba que el universo estaba encerrado dentro de la esfera de las estrellas fijas.



Arriba, Nicolás Copérnico fue el artífice de la revolución astronómica que derrumbó la concepción antropocéntrica, al idear un sistema heliocéntrico del movimiento de los planetas.

LAS OBSERVACIONES DE TYCHO BRAHE

Después de Copérnico fue Tycho Brahe quien hizo que la astronomía diera un gran paso adelante. Tycho Brahe fue un observador que alcanzó niveles muy altos de precisión, especialmente si se piensa que hacía las observaciones a simple vista. Fue él quien destruyó de una vez por todas el antiguo concepto de las esferas materiales: en 1577, se pudo observar el movimiento de



Arriba, de este modo imaginaba Copérnico el sistema solar en su visión heliocéntrica, visión que todavía estaba ligada al concepto tradicional según el cual la esfera de las estrellas fijas, como última esfera del cosmos, abarcaba el universo entero.

A la derecha, en esta sugestiva página, extraída del* Gran Atlas de Biaeu *y conservada en el Museo Naval de Rotterdam, se ilustra el observatorio de Tycho Brahe.

un cometa que pasó por el perihelio el 27 de octubre de aquel año y se hizo visible desde el 1 de noviembre de 1577 hasta el 26 de enero de 1578. Gracias a su observación, Tycho Brahe pudo darse cuenta de que la trayectoria del cometa cortaba las órbitas de los planetas. De ello dedujo que las esferas materiales no existían, ya que podían ser atravesadas sin dificultad alguna por el cuerpo del cometa, y que, por tanto, no había «ningún obstáculo para el libre curso de los planetas». La observación del movimiento concreto de aquel cometa provocó también una crisis de la concepción según la cual el movimiento natural de los cuerpos celestes sería circular uniforme. Los descubrimientos de Tycho Brahe contribuyeron en gran manera a derribar la vieja concepción del cosmos. En realidad, Tycho no estaba a favor ni del sistema tolemaico ni del copernicano. Consideraba que la Tierra estaba en el centro del universo y que la Luna y el Sol giraban alrededor de ella. A su vez, el Sol era el centro del sistema de órbitas de los otros planetas. Así, pues, el sistema de Tycho representaba un compromiso entre los otros dos sistemas.

LA INTERVENCIÓN DE KEPLER

En 1609, se publicó el libro *Astronomia nova*, con el que Kepler dio a la astronomía un gran impulso. En el tratado se exponían las dos primeras leyes que Kepler dedujo del movimiento de Marte. En el fondo, el movimiento retrógrado de este planeta no se había explicado plenamente; tampoco lo había hecho el sistema copernicano. Kepler se dio cuenta de que no se podían explicar todas las irregularidades de este movimiento si se consideraban sólo los movimientos circulares. Esto le llevó a suponer que los planetas se mueven siguiendo órbitas elípticas en vez de circulares. En efecto, la primera ley de Kepler afirma que las órbitas de los planetas son elipses de las cuales el Sol ocupa uno de los focos. En la segunda ley, se afirma que la línea que une el Sol con el planeta barre, durante el movimiento, áreas

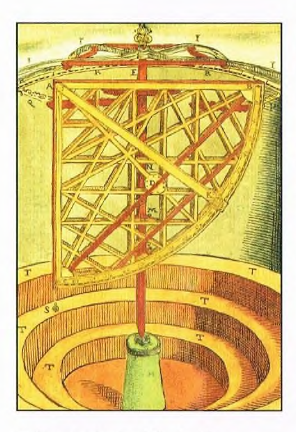
***Abajo, dibujo del sistema de Copérnico tal como aparece en la primera edición (1543) del* De Revolutionibus.**


in quo terram cum orbe lunari tanquam epicyclo contineri diximus. Quinto loco Venus nono mense reducitur. Sextum denique locum Mercurius tenet, octuaginta dierum spacio circũ currens. In medio uero omnium residet Sol. Quis enim in hoc

pulcherrimo templo lampadem hanc in alio uel meliori loco poneret, quàm unde totum simul possit illuminare? Siquidem non inepte quidam lucernam mundi, alij mentem, alij rectorem uocant. Trimegistus uisibilem Deum, Sophoclis Electra intuentẽ omnia. Ita profecto tanquam in solio regali Sol residens circum agentem gubernat Astrorum familiam. Tellus quoque minime fraudatur lunari ministerio, sed ut Aristoteles de animalibus ait, maximã Luna cũ terra cognationẽ habet. Concipit interea à Sole terra, & impregnatur annuo partu. Inuenimus igitur sub hac



A la derecha, Tycho Brahe ideó un modelo del sistema planetario en el que la Tierra estaba en el centro de la órbita de la Luna y del Sol. A su vez, el Sol estaba en el centro de las órbitas de todos los demás planetas. La esfera de las estrellas fijas seguía siendo concéntrica respecto a la Tierra.


Arriba, un cuadrante móvil acimutal. Este instrumento astronómico se utilizaba antiguamente para determinar la altura de los astros sobre el horizonte.


Arriba, Galileo apuntó su anteojo al cielo e hizo muchos descubrimientos astronómicos, entre ellos el de los satélites de Júpiter, que le parecieron una representación en pequeño del sistema copernicano.

iguales en tiempos iguales. Esto significa que el movimiento no se produce con una velocidad uniforme: el planeta se desplaza más rápidamente cuando está más próximo al Sol.

Estas dos leyes constituyeron un nuevo paso adelante en la simplificación de la descripción de los movimientos planetarios.

Más tarde, Kepler formuló una tercera ley según la cual el cuadrado del período de revolución de un planeta alrededor del Sol es proporcional al cubo del semieje mayor de la órbita elíptica. De esto se deduce que el tiempo que emplea un planeta para recorrer una vez su órbita no depende de la excentricidad (achatamiento) de la órbita misma, sino solamente de las dimensiones del semieje mayor.

LAS OBSERVACIONES DE GALILEO

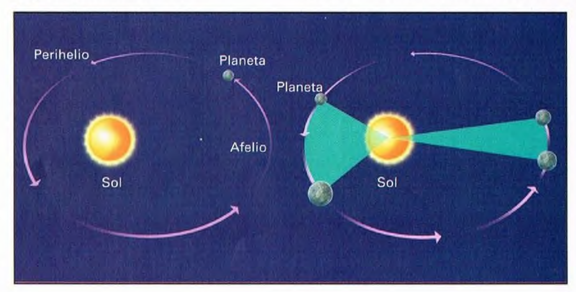
En 1610, Galileo Galilei publicó el *Sidereus Nuncius*, en el cual exponía muchos descubrimientos astronómicos, entre ellos la existencia de los satélites de Júpiter. Este planeta, con sus lunas, representaba, en pequeño, el sistema copernicano. Basándose en las observaciones hechas con su anteojo, Galileo se convirtió en un defensor del copernicanismo, por lo cual fue acusado de herejía.

La revolución astronómica corrió pareja con el progreso tecnológico, gracias al cual nuevos instrumentos permitieron perfeccionar las observaciones de los astros. El ejemplo más sobresaliente es el telescopio, con el cual Galileo pudo, por ejemplo, observar algunos objetos nebulares que existían en la Vía Láctea y reconocer que, en realidad, estaban formados por conjuntos de estrellas débiles.

ISAAC NEWTON

La revolución astronómica que se inició con Copérnico concluyó con Isaac Newton (1642-1727), que descubrió la fuerza de la gravedad. Esta fuerza rige el movimiento de los planetas alrededor del Sol. Dos cuerpos de masa m y M se atraen mutuamente con una fuerza F que es directamente proporcional al producto de las dos masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia r que las separa: $F = -GmM/r^2$. El signo menos indica que la fuerza de la gravedad es atractiva; G es la constante de la gravitación universal.

Newton generalizó las leyes de Kepler y demostró que las órbitas de los cuerpos celestes podían ser, además de elípticas, también parabólicas e hiperbólicas. Consiguió explicar muchos fenómenos, desde la caída de los cuerpos hasta las mareas y el movimiento de los planetas, y lo hizo unificando la física de los fenómenos terrestres con la de los fenómenos celestes.



Representación gráfica de las dos primeras leyes de Kepler.
A la izquierda, puede visualizarse la primera, que afirma que las órbitas de los planetas son elípticas y que el Sol ocupa uno de los focos. El punto de la órbita más próximo al Sol se llama perihelio y el más alejado, afelio.
A la derecha, se representa la segunda ley, según la cual el radio vector de un planeta barre áreas iguales en tiempos iguales.

EL DIAGRAMA DE HERTZSPRUNG Y RUSSELL

Relacionar la temperatura y la luminosidad intrínseca de una estrella fue la idea que dos astrónomos tuvieron hacia 1910 sin saber que habían dado con uno de los instrumentos teóricos más potentes de la astrofísica.



Entre los diversos parámetros característicos de una estrella, están la temperatura y la magnitud absoluta. La temperatura se halla estrechamente ligada al color de la estrella y éste al tipo espectral, es decir, al conjunto de líneas que aparecen cuando su luz se descompone por medio de un prisma. Según la clasificación adoptada actualmente, las estrellas se dividen, según su espectro, en siete clases principales cada una de las cuales responde a las letras del alfabeto O, B, A, F, G, K, M. Recorriendo esta secuencia, la temperatura decrece desde varias decenas de miles de grados en el tipo O (las estrellas más calientes) hasta unos 2.000 a 3.000 grados en el tipo M.

En cambio, la magnitud absoluta, es decir, la luminosidad intrínseca, indica la cantidad de energía que emite la estrella y sólo puede calcularse cuando también se conoce, o puede calcularse teóricamente, su distancia hasta la Tierra

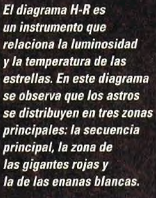
UNA IDEA FORMIDABLE

En 1913, un astrónomo holandés, Ejnar Hertzsprung (1873-1967) y otro estadounidense, Henry Norris Russell (1877-1957), tuvieron, independientemente uno de otro, la misma idea: construir un gráfico teórico que relacionara los dos parámetros estelares que se acaban de indicar: en horizontal, la

MAGNITUD ABSOLUTA Y APARENTE

La magnitud absoluta de una estrella indica su luminosidad intrínseca. Por definición, es la magnitud que presentaría una estrella si se hallara a una distancia estándar de la Tierra fijada en 10 parsec, es decir, 32,6 años luz. Magnitud aparente *m*, absoluta *M* y distancia *d* se relacionan según la fórmula: $m - M = -5 + 5\log(d)$.
Recuérdese que, para los astrónomos, magnitud absoluta y distancia son casi sinónimos, en el sentido en que, conocida una de las dos, siempre es posible hallar la otra.

En la imagen, una sugestiva fotografía del campo estelar nocturno.



El diagrama H-R es un instrumento que relaciona la luminosidad y la temperatura de las estrellas. En este diagrama se observa que los astros se distribuyen en tres zonas principales: la secuencia principal, la zona de las gigantes rojas y la de las enanas blancas.

temperatura, y en vertical, la magnitud absoluta. El resultado fue un diagrama que recibió el nombre de ambos astrónomos: diagrama de Hertzsprung-Russell o, sencillamente, el diagrama H-R.

UNA MUESTRA DE ESTRELLAS

Veamos cómo se construye un diagrama H-R. En primer lugar, hay que elegir una muestra de estrellas; por ejemplo, se pueden escoger aquéllas cuya distancia se conoce con una buena aproximación. Así, se puede determinar su magnitud absoluta mediante la relación: $m - M = -5 + 5 \log(d)$.

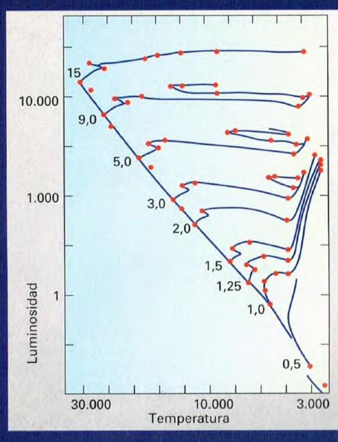
Luego, hay que saber también su temperatura. Para ello, es necesario identificar el tipo espectral de las estrellas en cuestión. En realidad, hoy es más frecuente utilizar, en vez del tipo espectral, otro parámetro equivalente que se conoce como índice de color. Se encuentra midiendo la magnitud de la estrella en dos longitudes de onda distintas, por ejemplo, en el azul y en el amarillo, y obteniendo su diferencia.

LA SECUENCIA PRINCIPAL

En el diagrama H-R, la mayor parte de las estrellas se disponen en una franja en diagonal que va desde la parte superior izquierda hasta la parte inferior derecha. Esta franja se llama secuencia principal y las estrellas que se disponen en ella se llaman estrellas de la secuencia principal. También nuestro Sol es una estrella de la secuencia principal y está ubicado en la parte que corresponde a las estrellas amarillas, con una temperatura superficial de 5.600 grados aproximadamente. Las estrellas de la secuencia principal son las que se hallan en la fase más tranquila y estable de su vida, durante la cual, en sus núcleos, se funden los átomos de hidrógeno para formar helio. El hecho de que en una muestra cualquiera haya tantas estrellas que ocupan la secuencia principal se explica porque la fase estable ocupa aproximadamente el 90% de la vida de cualquier estrella. Estadísticamente, de 100 estrellas (naturalmente, cada una de ellas colocada en el lugar que le corresponde según su temperatura y luminosidad), 90 se incluyen en esta fase.

UN EQUILIBRIO DELICADO

Inmediatamente, la secuencia principal nos da otra información muy importante. El hecho de que la



EL ÍNDICE DE COLOR

El índice de color es un parámetro fundamental de la astrofísica moderna. Es, esencialmente, la diferencia entre las magnitudes que presenta una estrella a dos longitudes de onda diferentes. Pueden hacerse infinitos índices de color, midiendo magnitudes en las diversas longitudes de onda del visible (amarillo, azul, rojo, etc.) y también en longitudes de onda fuera de la ventana óptica, por ejemplo, en el infrarrojo, y luego estableciendo todas las diferencias posibles.

La importancia de este parámetro reside en el hecho de que permite comparar la cantidad de energía que emite una estrella a las diversas longitudes de onda, y ésta depende estrechamente de la temperatura superficial del astro.

El índice de color más importante es el llamado B – V (léase B menos V), que representa la diferencia entre las magnitudes en el azul y en el visible (que corresponde al amarillo).

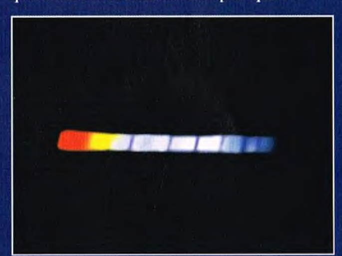
Finalmente, estos dos parámetros se sitúan en un plano cartesiano donde en el eje de las abscisas hay la temperatura, decreciente de izquierda a derecha, y en el de las ordenadas se encuentra la luminosidad absoluta, que aumenta de abajo a arriba. Se observará entonces que las estrellas no se distribuyen casualmente en todo el diagrama, sino que se agrupan en algunas zonas bien definidas.

A la izquierda, trazas evolutivas de las estrellas a la salida de la secuencia principal. Una estrella que tiene la masa del Sol ocupa la posición 1,0. Al aumentar la masa, las estrellas aumentan también de luminosidad y se disponen cada vez más arriba en el diagrama.

secuencia sea tan estrecha indica el delicado equilibrio que existe en las estrellas entre la fuerza de la gravedad, que empuja hacia el interior, y la fuerza debida a las reacciones nucleares, que empuja hacia el exterior. Por ejemplo, una estrella como nuestro Sol, con una temperatura de 5.600 grados, debe tener una magnitud absoluta, es decir, una luminosidad intrínseca, de +4,7 aproximadamente, que es la que le corresponde en el diagrama H-R. No podría ser ni más ni menos brillante, porque de lo contrario no estaría en equilibrio. ¡Parece como si las estrellas conocieran las leyes de la física y, de acuerdo con ellas, supieran autorregularse!

LAS ESTRELLAS GIGANTES ROJAS

En el diagrama H-R, en la parte superior derecha, fuera de la secuencia principal, está la zona de las gigantes rojas. Se trata de estrellas frías (alrededor de 3.000 grados) que, sin embargo, son mucho más luminosas que las estrellas de la misma temperatura que se encuentran en la secuencia principal. Por esto, los astrónomos han comprendido que existen dos tipos distintos de estrellas frías, con una luminosidad muy diferente. La pregunta que aquí puede plantearse es la siguiente: dado que es la temperatura la que determina cuánta energía emite una estrella, ¿cómo es posible que, a igualdad de temperatura, puedan ser tan distintas en su luminosidad? La respuesta lógica es que las más



Un ejemplo de espectro estelar. A partir de las rayas presentes puede calcularse su temperatura superficial.

Esta imagen de Sirio, de gran aumento, muestra también a la compañera de esta conocidísima estrella, Sirio B (enana blanca), que es el hinchamiento en uno de los rayos que parten de la principal.







Arriba, Arturo, en la constelación del Boyero, es una estrella de 10.000 millones de años y es el primer astro cuya temperatura superficial se determinó (3.900 °C).

luminosas lo son, simplemente, porque su tamaño es mucho mayor y, por este motivo, tienen una superficie radiante también mucho mayor. De ahí el nombre de gigantes que se da a estas estrellas, cuyo diámetro puede llegar a ser 200 veces mayor que el del Sol y alcanzar los 300 millones de kilómetros, lo que equivale al doble de la distancia Sol-Tierra.

LAS ENANAS BLANCAS

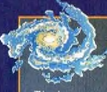
Del mismo modo se explica la presencia de un grupito de estrellas en la parte inferior izquierda del diagrama. Se trata de estrellas blancas muy calientes, pero muy poco luminosas. Para ser tan débiles, a igualdad de temperatura con las estrellas blancoazuladas, grandes y calientes, de la secuencia principal, han de ser mucho más pequeñas que éstas.



Arriba, Antares, estrella roja de la constelación de Escorpión, es, aproximadamente, 700 veces mayor que el Sol. La región del firmamento en la que se encuentra es rica en nebulosidades multicolores. En la imagen, además de Antares, pueden verse, a su derecha, M4 y M80.

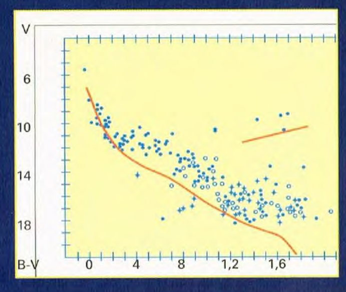


Arriba y al lado: comparación entre las dimensiones de algunas estrellas. En el primer dibujo, arriba, vemos representado el Sol (una estrella de la secuencia principal), una enana blanca y una gigante roja. Al lado, una estrella de neutrones, un agujero negro y una enana blanca. El diámetro de las estrellas se expresa en kilómetros.

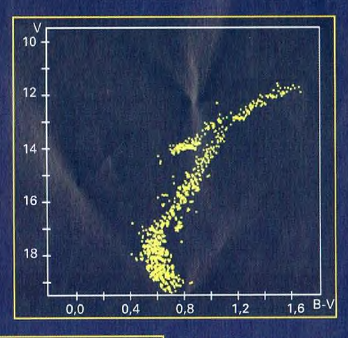


EL PLANO CARTESIANO

El plano cartesiano, llamado así en honor del gran filósofo y matemático del siglo XVII René Descartes, es un plano en el cual se dibujan dos rectas, o ejes, generalmente perpendiculares entre sí. Sobre ellos se fijan unas escalas con las unidades de medida apropiadas. El eje horizontal se llama eje X, o eje de las abscisas, mientras que el vertical es el eje Y, o eje de las ordenadas. En el plano cartesiano, un punto se identifica unívocamente por un par de números que son sus coordenadas cartesianas. Sobre los dos ejes es posible insertar las medidas de cualquier magnitud física: longitudes, tiempos, temperaturas, etc. Estos gráficos son muy útiles porque permiten verificar con sólo una ojeada cómo varía cierta magnitud en función de otra. Por ejemplo, en el caso del diagrama H-R puede ponerse de manifiesto la manera en que varía la magnitud absoluta de las estrellas en función de su temperatura.



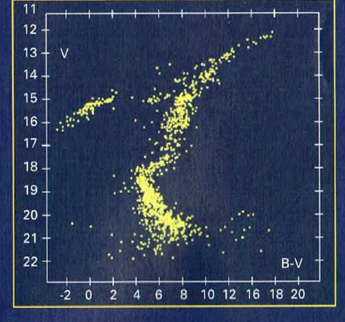
A la izquierda, en los diagramas H-R de grupos de estrellas jóvenes, como las de los cúmulos abiertos, se observa que no hay ninguna enana blanca ni ninguna gigante roja. Todas las estrellas se encuentran en la secuencia principal, o bien todavía no la han alcanzado y están a la derecha de ella.



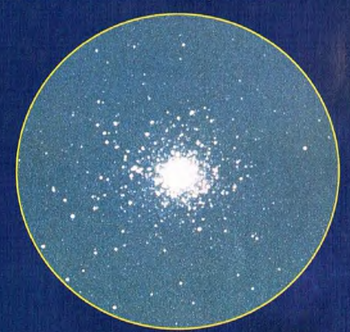
Son las enanas blancas, unas estrellas extraordinariamente densas y compactas, 100 veces más pequeñas que el Sol, con diámetros similares al de un planeta como la Tierra. Para dar una idea de la increíble densidad de estas estrellas, basta pensar que un centímetro cúbico de la materia que las forma en la Tierra pesaría más o menos una tonelada.

DIAGRAMAS H-R DE LOS CÚMULOS ESTELARES

Las estrellas pertenecientes a un cúmulo estelar son muestras muy interesantes para ser estudiadas mediante el diagrama H-R. Puede suponerse que todas están aproximadamente a la misma distancia de nosotros y que, por tanto, las diferencias de luminosidad que se observan entre las estrellas de un cúmulo son diferencias intrínsecas, no debidas a diferencia de distancia. Por esto es posible utilizar, en este caso, la magnitud aparente (que siempre es fácilmente medible) en vez de la absoluta, y construir igualmente el diagrama H-R del cúmulo. Procediendo así, se observa que los diagramas de los diversos cúmulos son muy diferentes.

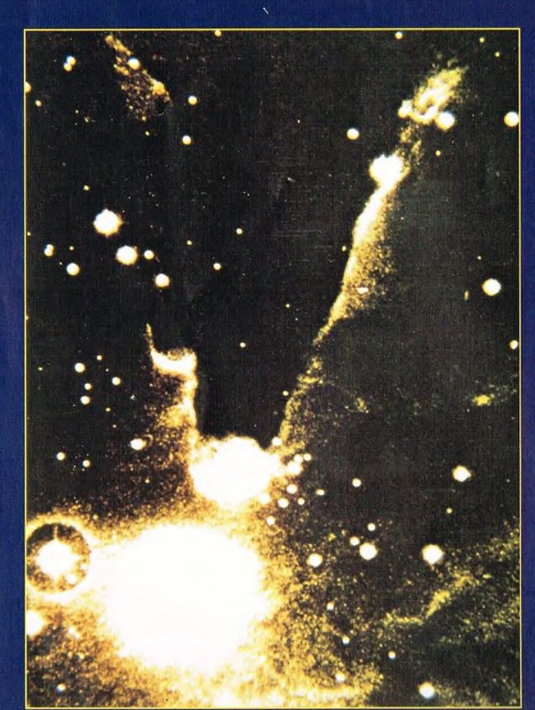


Arriba y al lado, los cúmulos globulares son estrellas muy viejas que, por este motivo, han tenido tiempo de atravesar diversas fases de su evolución. En el diagrama H-R, esto se observa por la ausencia de estrellas calientes de secuencia principal, que ya se han desplazado hacia la derecha, a la zona de las gigantes rojas. Abajo, M8 (nebulosa Laguna) es particularmente rica en regiones de estrellas jóvenes.



Arriba, el cúmulo globular M5 está formado por estrellas muy viejas, todas con una masa inferior a la del Sol. M5 tiene un diagrama H-R de tipo igual al que se muestra en el gráfico de arriba.





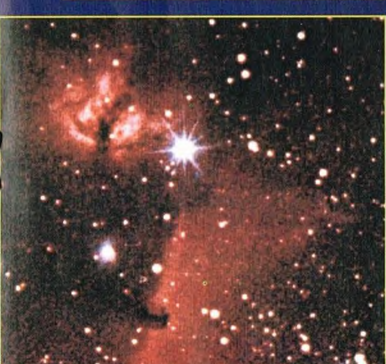
A la izquierda, una fotografía de la nebulosa oscura en el interior de la región ocupada por la nebulosa difusa 2264. Aquí hay estrellas jovencísimas y de una gran luminosidad.

LA EVOLUCIÓN DE LAS ESTRELLAS

Los diagramas de cúmulos abiertos jóvenes, como M8 o NGC 2264, aparecen ya algo distintos de los estándar. La secuencia principal es bastante evidente, pero las estrellas aparecen más bien dispersas, sobre todo en la parte baja. Esto se explica por el hecho de que estos cúmulos están poblados por estrellas muy jóvenes, que tienen unas pocas decenas, o centenares, de millones de años. En tan poco tiempo, las estrellas menos masivas y luminosas, que evolucionan muy lentamente, todavía no han tenido tiempo de estabilizarse y son, por tanto, estrellas de presecuencia. Se hallan todavía en una fase que, en el diagrama H-R, se encuentra a la derecha de la secuencia principal, y se están moviendo lentamente hacia ella, conquistando poco a poco su equilibrio.

LOS CÚMULOS GLOBULARES

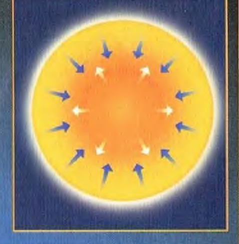
Por el contrario, en los diagramas H-R de los cúmulos globulares, poblados de estrellas muy viejas, la secuencia principal es difícil de identificar y sólo se encuentran huellas de ella en la parte baja, donde hay estrellas más frías. Esto es así porque las estrellas más calientes y luminosas ya han terminado la fase estable de su existencia y, por tanto, abandonado la secuencia principal y desplazado hacia la derecha, a la zona de las gigantes rojas o, incluso, superada ésta, hacia la región de las enanas blancas. Si pudiéramos seguir la evolución de una estrella durante toda su vida, la veríamos desplazarse lentamente en el diagrama H-R siguiendo el cambio de sus características. Por consiguiente, el diagrama permite estudiar cómo evolucionan las estrellas en el transcurso de su existencia, pasando por diversas fases durante las cuales sufren transformaciones, a veces muy profundas. Podría decirse que la diversidad de estrellas que observamos no corresponde tanto a auténticas diferencias entre una estrella y otra como a momentos diferentes de su evolución.



Orión, donde vemos encuadrada la Cabeza de Caballo, es una de las principales zonas de formación estelar.

EL EQUILIBRIO DE UNA ESTRELLA

La vida de una estrella transcurre en el equilibrio que se establece entre la fuerza derivada de las reacciones nucleares (tienen lugar en el centro del astro) y que presiona hacia el exterior, y la gravedad, que tiende a comprimirla. Cuando este equilibrio se altera, la estrella se aleja de la secuencia principal, moviéndose en el diagrama H-R.



En este dibujo se representan la fuerza que deriva de las reacciones nucleares (flechas hacia el exterior) y la gravedad (flechas hacia el interior) de una estrella.

CAN MAYOR

La constelación del Can Mayor contiene la estrella más luminosa de todo el firmamento: Sirio.



El Can Mayor, como el cercano Can Menor, es una constelación ligada a Orión. En realidad, los dos canes celestes son los sabuesos que acompañaban al cazador en sus correrías.

CÓMO LOCALIZAR LA CONSTELACIÓN

La constelación puede hallarse partiendo de Orión: las tres estrellas del cinturón del gigante apuntan hacia el sureste, precisamente en dirección a Sirio, cuya luminosidad es tal que atrae la atención del observador más distraído.

ESTRELLAS NOTABLES

La estrella más importante de la constelación, Alfa, es también la más luminosa de todo el firmamento: la refulgente Sirio (magnitud –1,5). Su gélida luz blanca resplandece en las noches invernales junto a otras estrellas de color similar. Los telescopios más potentes muestran que, junto a Sirio, hay una estrella pequeña mucho más débil (magnitud 8,7), tanto, que difícilmente es perceptible al lado de su formidable compañera. Esta pequeña estrella, llamada Sirio B, fue una de las primeras enanas blancas que se descubrieron. Según la tradición, fue el hijo del óptico Clark quien la vio por primera vez mientras probaba, apuntándolo hacia Sirio, un instrumento que acababa de construir su padre. No obstante, la existencia de esta

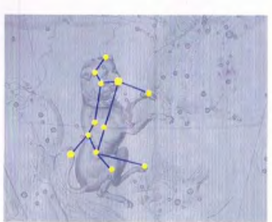


Sirio (abajo a la izquierda) es la estrella más luminosa del firmamento. En cambio, la nebulosa rojiza, conocida como NGC 2327 (arriba, a la derecha), es una nebulosa inmensa y difusa que se extiende desde la constelación del Can Mayor hasta la del Unicornio.

estrella ya se había previsto teóricamente, puesto que Sirio se desplaza en el firmamento oscilando regularmente durante un período de 50 años. Estas oscilaciones se explicaban suponiendo la existencia de un cuerpo que orbitaba en torno a la estrella: Sirio B es el cuerpo responsable de este movimiento. Además de ser la estrella más luminosa del firmamento, Sirio es también una de las más próximas a nosotros: dista de la Tierra unos 8,5 años luz.

Beta (magnitud 2) se llama también Mirzam, que significa «el Anunciador», porque precede a Sirio, la más luminosa, cuando la constelación se alza sobre el horizonte. Beta es una estrella azul muy caliente, cuya luminosidad oscila de manera imperceptible para el ojo humano. Es mucho más lejana que Alfa, ya que se halla a unos 750 años luz de nosotros. Si colocásemos a Sirio y a Mirzam a la misma distancia de la Tierra, veríamos que la segunda es más brillante que la primera.

Entre las otras estrellas de la constelación parece que Gamma (magnitud 4,1), llamada Muliphen, ha cambiado de luminosidad en el transcurso de los siglos. Finalmente, la estrella Épsilon (magnitud 1,5), o Adhara, que significa «las vírgenes», tiene una compañera de magnitud 8, cuya visibilidad está obstaculizada por la luminosidad de la componente principal.



El Can Mayor celeste es el fiel compañero de Orión, el cazador infalible que suscitó las iras de Diana.

OBJETOS DEL CAN MAYOR

Dentro de los límites de la constelación, encontramos dos objetos dignos de mención. Son fácilmente observables incluso con telescopios de aficionado. Se trata de los cúmulos abiertos M41 y NGC 2362.

El primero es tan luminoso que, en condiciones favorables y haciendo la observación lejos de luces parásitas, puede verse a simple vista. Parece que ya fue conocido en la Antigüedad, muchos siglos antes de la invención del telescopio. Está compuesto por unas 100 estrellas que se hallan a más de 2.000 años luz de la Tierra.

Para observar NGC 2362 se necesita un telescopio. Puede localizarse con facilidad alrededor de la estrella Tau, que, quizá, forma parte del cúmulo. Está formado por unas 40 estrellas que se encuentran a 4.000 años luz de nuestra Tierra.

LOS MITOS Y LAS ESTRELLAS

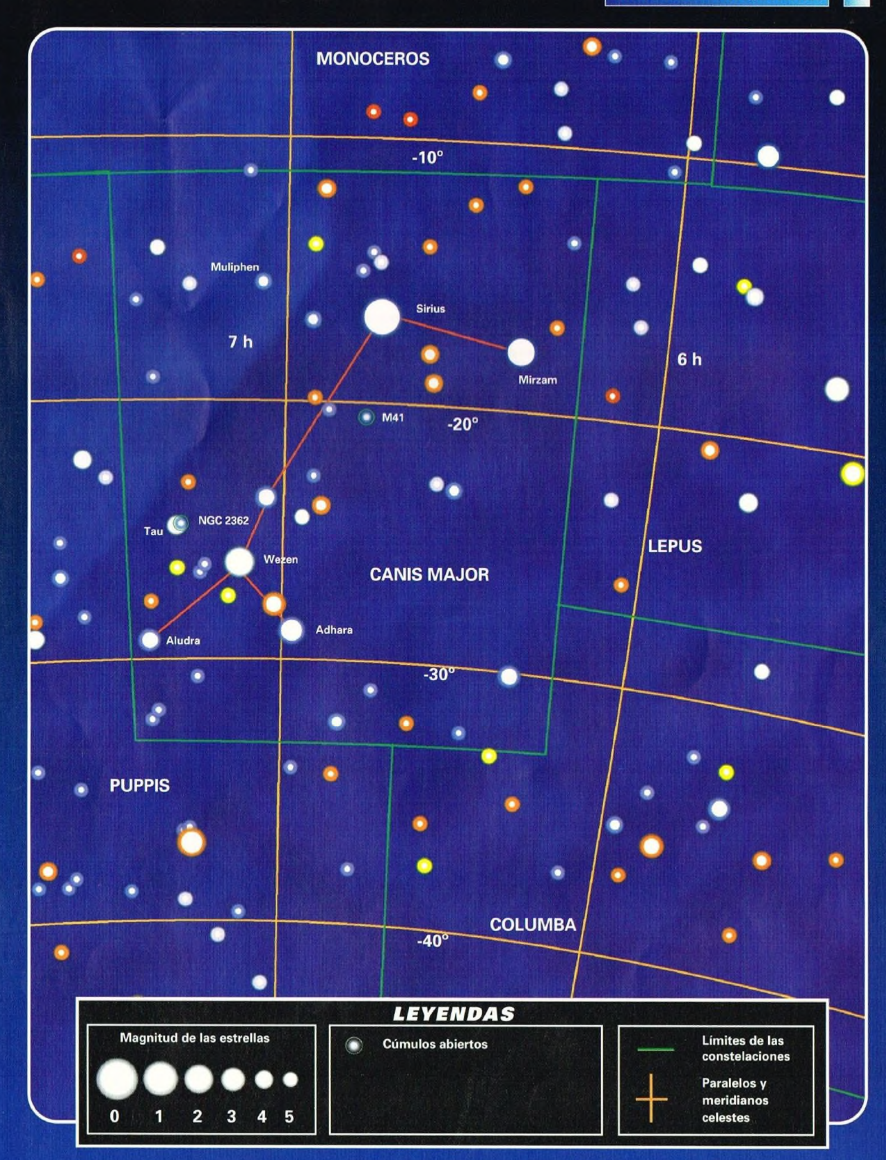
CAN MAYOR

Según algunas leyendas, el Can Mayor representa uno de los dos perros que ayudaban al cazador Orión; el segundo es el cercano Can Menor. En cambio, según otros, es el mítico can que perteneció a Céfalo y que intentó cazar un zorro que aterrorizaba los campos próximos a Tebas. Este zorro era muy veloz y huía de todos cuantos le perseguían. Sin embargo, el perro, aunque era igualmente rápido, sólo consiguió acercarse a su presa y estar a punto de atraparla. Como la persecución seguía sin posibilidad de interrupción, intervino Júpiter, que mató a los animales y dejó al perro en el cielo en forma de constelación.

DÓNDE BUSCARLA

CAN MAYOR

La constelación del Can Mayor abarca una región del cielo comprendida entre 11° S y 33° S de declinación, y entre 6 horas 10 minutos y 7 horas 25 minutos de ascensión recta. Es íntegramente visible todo el año desde latitudes más al sur de 79° S y parte del año desde latitudes comprendidas entre 79° S y 57° N. Por encima de 57° N nunca es enteramente visible.


MONOCEROS
-10°
Muliphen
Sirius
7 h
6 h
Mirzam
M41
-20°
NGC 2362
Tau
Wezen
LEPUS
CANIS MAJOR
Adhara
Aludra
-30°
PUPPIS
COLUMBA
-40°
LEYENDAS
Magnitud de las estrellas
0 1 2 3 4 5
Cúmulos abiertos
Límites de las constelaciones
Paralelos y meridianos celestes

EL TELESCOPIO

Aunque en la Edad Media ya se conocían los principios de la óptica, no fue hasta el siglo XVI cuando tales principios se utilizaron para fabricar instrumentos que potenciasen la capacidad del ojo humano.

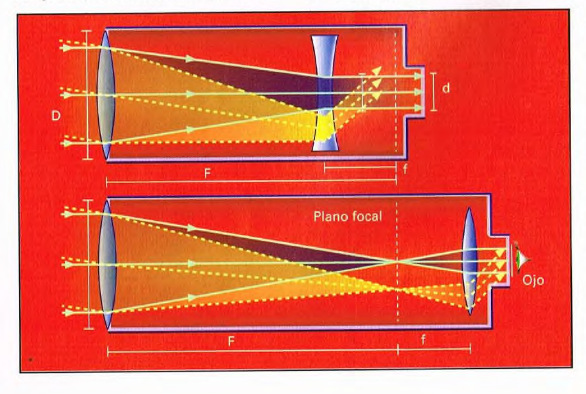


Los telescopios son los instrumentos más antiguos utilizados por el hombre para observar el cielo. En realidad, los principios de la óptica aplicada se remontan a mediados del siglo XIII, aunque los primeros telescopios no fueron construidos hasta comienzos del siglo XVII por algunos ópticos holandeses. Pero el primer científico que usó sistemáticamente un telescopio aplicado a la astronomía fue Galileo Galilei (1564-1642), inventor, entre otras cosas, de un modelo de telescopio que todavía hoy lleva su nombre. Fue precisamente el uso de este instrumento lo que permitió a Galileo descubrir algunos satélites de Júpiter.

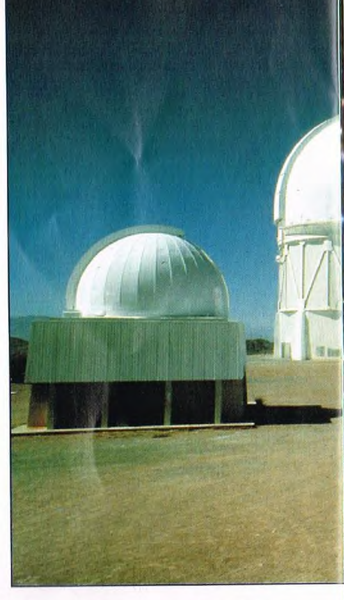
¿POR QUÉ USAMOS UN TELESCOPIO?

En una noche serena y sin Luna, lejos de fuentes de luz artificial, pueden observarse a simple vista estrellas de luminosidad superior a la sexta magnitud. En efecto, por una cuestión física ligada al tamaño de la pupila, existe un límite para la cantidad de luz que el ojo humano puede captar. Para observar objetos de luminosidad más débil, es necesario captar de los cuerpos celestes observados un flujo luminoso mayor, lo cual requiere el empleo de instrumentos artificiales dotados de áreas colectoras mayores. Estos instrumentos son los telescopios. Utilizando, simplemente, un telescopio normal de aficionado ya es posible, por ejemplo, observar estrellas de decimosegunda magnitud. Evidentemente, la cantidad de flujo luminoso que puede captarse con cualquier telescopio depende de las dimensiones de la superficie de captación del propio telescopio y es proporcional al cuadrado del diámetro del objetivo de este instrumento. Esto significa que un telescopio con un objetivo de 4 m recoge 16 veces más luz que un telescopio de 1 m. Además de garantizar una sensibilidad mayor, un telescopio tiene otra ventaja: proporcionar más poder de resolución respecto al ojo humano, lo que quiere decir que no sólo permite observar objetos más débiles, sino también recoger detalles más finos que, de otro modo, escaparían a nuestra vista. Naturalmente, esto tiene una importancia extraordinaria para estudiar la morfología de ciertas clases de cuerpos celestes, como las galaxias.

La parte principal de un telescopio es el objetivo, que cumple esencialmente dos misiones. La primera es recoger la luz de los objetos observados; la segunda, concentrarla en el foco del telescopio. Según el tipo de objetivo que empleen, los telescopios se dividen en dos categorías principales: refractores y reflectores.

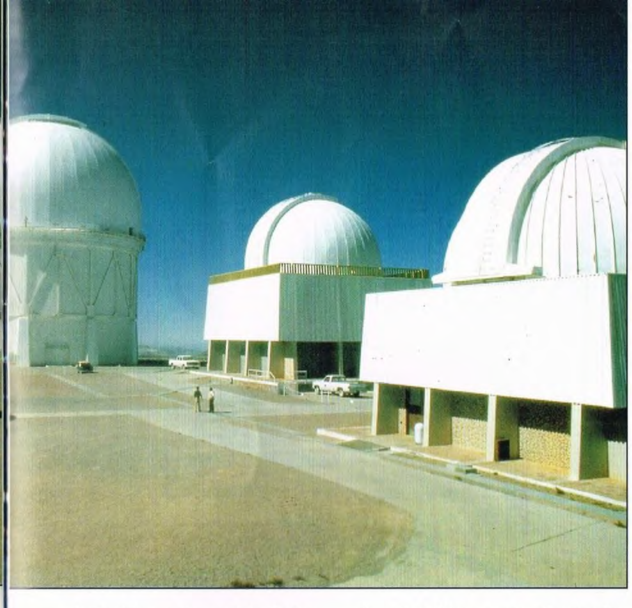


Los dos esquemas presentan respectivamente, la disposición del telescopio de Galileo y el de Kepler.* F *representa la distancia focal;* f *la distancia entre el foco y las lentes;* D *es el diámetro del objetivo;* d *el de la pupila.



LOS TELESCOPIOS REFRACTORES

En los refractores, el objetivo lo constituye una lente convergente cuya función es recoger la luz y concentrarla en un punto preciso de su eje de simetría, llamado foco. Por este motivo, el eje de simetría de la lente se llama también eje focal. Uno de los parámetros característicos de un telescopio está representado por la distancia entre el foco y el objetivo, llamada distancia focal y expresada por *F*. El valor de la distancia focal varía según la forma de la lente que se utiliza para el objetivo (esférica, parabólica, etc.). La relación entre la distancia focal *F* y el diámetro del objetivo *D* define además la relación focal del telescopio (F/D). Además del objetivo, los telescopios refractores



Arriba, el observatorio astronómico de Cerro Tololo, en Chile. Los observatorios astronómicos se construyen en lugares que gozan de una estabilidad atmosférica especial.

emplean otro sistema de lentes, de dimensiones menores, que sirven para ampliar la imagen. Estas lentes están colocadas en puntos distintos del eje focal, según el esquema óptico del telescopio. La relación entre la distancia focal del telescopio F y la distancia f entre el foco y las lentes auxiliares determina la ampliación de la imagen. En el esquema llamado de Galileo, por ejemplo, se emplea una lente divergente colocada entre el objetivo y el foco. En el diseño llamado kepleriano, en cambio, la ampliación de la imagen se obtiene mediante una lente convergente colocada más allá del foco del telescopio. Sin embargo, los telescopios refractores presentan algunos problemas. El más importante es la aberración cromática. En efecto, en el fenómeno de la refracción, cuando la radiación luminosa pasa a través de un medio transparente –como es, precisamente, el objetivo de vidrio de un telescopio–, se desvía un ángulo diferente (ángulo de refracción) en función de su longitud de onda, y cuanto mayor es la longitud de onda de la luz menor es su desviación. Por este motivo, la radiación luminosa no se concentra en un foco único, sino que se dispersa en diferentes puntos del eje focal. Este problema puede compensarse parcialmente utilizando las lentes adecuadas para modificar el ángulo de refracción, o bien atenuarlo con el empleo de telescopios de distancia focal mayor. Por este motivo, los primeros telescopios refractores eran muy largos. Además, algunas limitaciones técnicas impiden utilizar lentes de grandes dimensiones. En efecto, las lentes están sostenidas por la estructura del telescopio, lo que se consigue colocando fijaciones alrededor del borde. Si estas fijaciones fuesen de dimensiones demasiado grandes, las lentes tenderían a curvarse por efecto de su propio peso y la deformación del objetivo produciría una distorsión de la imagen. Por este motivo, los telescopios refractores tienen un tamaño moderado. El mayor telescopio refractor en servicio actualmente es el del observatorio de Yerkes (Wisconsin), cuyo objetivo tiene un metro de diámetro.

SCHMIDT-CASSEGRAIN

Espejo secundario

Espejo principal

Lente correctora

Ocular

El esquema de arriba se refiere a la solución óptica Schmidt-Cassegrain, que tiene la ventaja de ser muy compacta y poseer una lente correctora que neutraliza la aberración esférica del espejo.

EL PODER DE RESOLUCIÓN

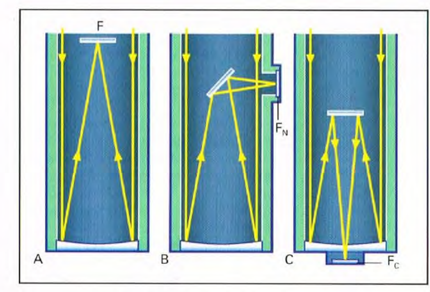
El poder de resolución o poder separador de un instrumento está definido por el valor mínimo del ángulo q bajo el cual dos fuentes de luz puntiformes se nos aparecen distintas. Suponiendo que la luz sea recogida por un colector de luz de sección circular, el poder de resolución teórico es directamente proporcional a la longitud de onda incidente l e inversamente proporcional al diámetro del colector D.
En el caso del ojo humano, por ejemplo, el diámetro D es el de la pupila, es decir, unos 6 mm. Considerando la luz amarilla (l = 5.500 Å), se obtiene un poder de resolución de unos 23 segundos de arco. En cambio, en un telescopio de 15 cm, el poder de resolución es de 0,9 segundos de arco. Naturalmente, el poder de resolución teórico casi nunca se alcanza en los telescopios terrestres. En efecto, a causa de los fenómenos de turbulencia de nuestra atmósfera, la imagen de una estrella tiende a ensancharse, adquiriendo una dimensión angular superior al poder de resolución del instrumento. Así, pues, este límite teórico sólo se alcanza utilizando telescopios instalados fuera de la atmósfera terrestre, como el telescopio espacial Hubble.

LOS TELESCOPIOS REFLECTORES

La mayor parte de los telescopios profesionales son reflectores. En este tipo de telescopios, el colector de luz no es una lente, sino un espejo de forma parabólica. Por tanto, se elimina el problema de la aberración cromática, ya que la reflexión de la luz es independiente de su longitud de onda. Por otra parte, las estructuras de sostén pueden aplicarse también detrás del espejo, lo que permite la construcción de telescopios mayores. En los modelos más sencillos, la luz es captada por el espejo y enviada hacia un punto de recogida llamado foco principal. En la mayoría de casos, sin embargo, se prefiere utilizar también espejos auxiliares de menores dimensiones para llevar la luz

LA MAGNITUD LÍMITE

Los primeros telescopios se utilizaban simplemente de modo visual, es decir, el astrónomo se limitaba a observar la imagen del firmamento a través de un ocular, y el papel de receptor de la luz era confiado al ojo humano. En este caso, la magnitud límite depende principalmente de las dimensiones del colector de luz (lente o espejo) según la relación:
$m = 16 + 54\log 10\ (D)$
donde m es la magnitud límite y D es el diámetro del telescopio expresado en metros. En los telescopios más modernos, el ojo humano ha sido sustituido por detectores artificiales, como placas fotográficas o los más modernos detectores de estado sólido que, a diferencia del ojo humano, son capaces de acumular el flujo luminoso recogido durante largos intervalos de tiempo. Esto permite detectar objetos todavía más débiles. Por tanto, la magnitud límite depende también de la duración de la observación t:
$m = 12{,}5 + 54\log 10\ (D) + 2{,}54\ \log 10\ (t)$
Naturalmente, la utilización de estos detectores permite no sólo aumentar notablemente la eficacia de un telescopio, sino también poder registrar las imágenes obtenidas para someterlas a un análisis más exhaustivo.



Los esquemas de arriba representan tres disposiciones ópticas del reflector de espejo parabólico. A: de foco directo, o principal (F); B: newtoniana, en la que los rayos del espejo principal son desviados 90° por un espejo secundario, de foco lateral F_N; C: Cassegrain. En esta última, los rayos reflejados por el espejo principal llegan a un foco F_C, pasando por un orificio central que se le ha practicado.

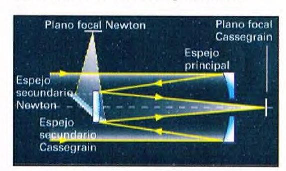
En los reflectores de tipo newtoniano, así llamados porque fueron ideados por Isaac Newton en 1668, se coloca un espejo plano de pequeñas dimensiones a lo largo del eje focal para desviar la luz recogida por el espejo principal hacia el foco secundario, colocado en el exterior del cuerpo del telescopio. La posición del espejo secundario se elige de modo que no modifique la distancia focal. Esta configuración es una de las más habituales en los pequeños telescopios que se utilizan preferentemente de manera visual, pero es desaconsejable en el caso de telescopios profesionales de mayores dimensiones, en los cuales la instrumentación científica en el foco del telescopio alteraría el equilibrio de toda la estructura. La configuración más habitual en los telescopios profesionales es, por tanto, la de tipo Cassegrain.

En este caso, la luz recogida por el espejo principal se refleja hacia un secundario convergente de forma hiperbólica, colocado siempre a lo largo del eje focal, y de ahí se refleja nuevamente, a través de una hendidura del espejo principal, hacia el foco secundario. Las ventajas de esta configuración son muchas. En primer lugar, es posible conseguir una distancia focal mayor, incluso empleando un tubo de dimensiones relativamente pequeñas. Además, los instrumentos científicos pueden estar dispuestos a lo largo del eje focal, lo cual garantiza un mayor equilibrio de toda la estructura. Al igual que en la configuración newtoniana, también en los reflectores de tipo Coudé el foco es exterior

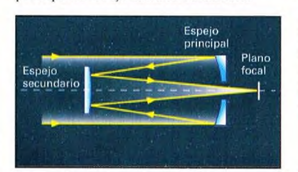


Arriba, el telescopio de 102 cm del observatorio de Yerkes, en Wisconsin (Estados Unidos), es el mayor refractor del mundo.

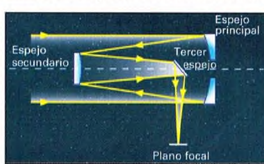
recogida por el espejo principal hacia un foco secundario. Por esto, según la posición de los espejos secundarios, y su forma, a lo largo del recorrido de la luz, es posible obtener muchísimas configuraciones.



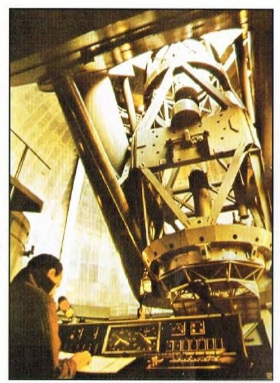
Esquema del telescopio reflector Newton-Cassegrain. El espejo puede ser intercambiado, obteniéndose un foco u otro.



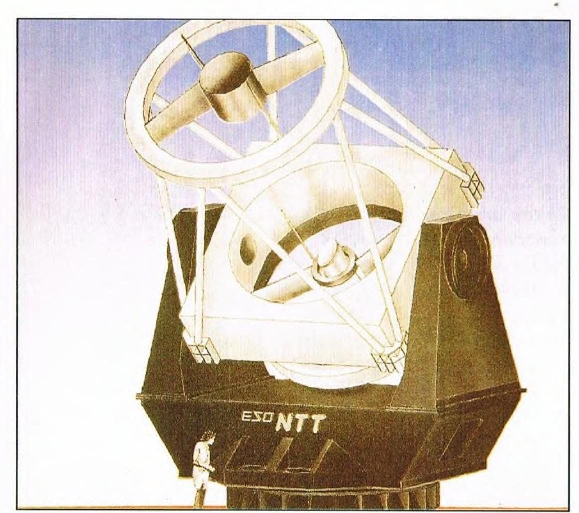
Esquema del telescopio reflector Ritchey-Chrétien, que ofrece la ventaja de una solución mayor y más compacta que el Cassegrain.



Esquema del telescopio reflector acodado, más conocido con el nombre de Coudé. El foco se encuentra en una posición fija.



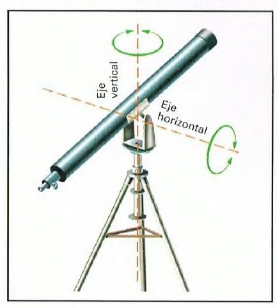
Arriba, el telescopio reflector de monte Palomar, a 200 km al sur de Los Ángeles (Estados Unidos), llamado comúnmente «el 5 metros».



Arriba, en este dibujo se representa el ESO NTT, el New Technology Telescope, que opera en el European Southern Observatory de La Silla, en Chile. Se trata de un telescopio de óptica activa, provisto de un espejo de espesor muy reducido.

al telescopio. El esquema prevé, además del espejo principal, otro secundario hiperbólico y dos espejos planos paralelos, inclinados 45° respecto al eje focal. Aunque la configuración Coudé es conceptualmente más complicada que las anteriores, la posición del foco, relativamente distante del telescopio, presenta la ventaja de poder desplazar separadamente los instrumentos científicos; no hay, por consiguiente, limitaciones en lo tocante a tamaño. Finalmente, la configuración Nasmyth es muy parecida a la Coudé, con la diferencia de que hay un único espejo plano dispuesto a lo largo del eje focal.

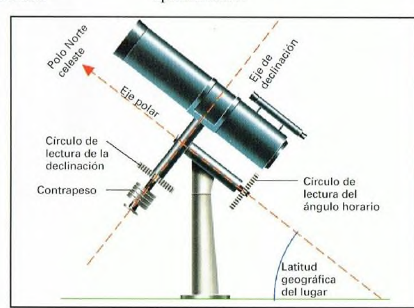
Abajo, un dibujo de telescopio con montura altacimutal, adecuada para pequeños instrumentos montados sobre trípode.



LOS TIPOS DE MONTURA

La montura es la estructura del soporte principal de un telescopio y, naturalmente, sólo se utiliza para los telescopios terrestres. En los telescopios profesionales, es fundamental disponer de una montura lo más estable posible para garantizar la precisión del apuntamiento y permitir observaciones de alta calidad científica. El tipo de montura más utilizado por los grandes telescopios es la ecuatorial, constituida por un eje polar, paralelo al eje de rotación terrestre, y un eje ortogonal en el cual se monta el telescopio. Así, haciendo girar el telescopio en torno a este eje, es posible regular la dirección del apuntamiento. La ventaja de la montura ecuatorial es que, haciendo girar el sistema alrededor del eje polar, puede compensarse el movimiento de rotación de la Tierra y, por consiguiente, tener apuntado el telescopio en una dirección determinada. Una montura alternativa es la llamada altacimutal, en la cual el telescopio está montado sobre un eje acimutal perpendicular al suelo, capaz de girar sobre sí mismo 360°, y un eje perpendicular a este último que sirve para regular la altura del apuntamiento.

A la derecha, esquema detallado de un telescopio con montura ecuatorial. Obsérvese el eje polar, que es uno de los dos ejes de rotación y está apuntado hacia el polo Norte celeste.



EL NACIMIENTO DE LA AGENCIA ESPACIAL EUROPEA

En los años sesenta, los europeos, ante los éxitos fulgurantes de estadounidenses y rusos, tenían por imposible el sueño de convertirse en conquistadores del espacio. Después de un cuarto de siglo, la Agencia Espacial Europea ya tiene entidad propia.



Europa ha aportado una contribución importante a la realización de un sueño ancestral del hombre: alcanzar las estrellas. Gracias a la Agencia Espacial Europea (ESA), el Viejo Continente ha demostrado que una cooperación internacional pacífica puede conducir al éxito. El viejo sueño europeo de una exploración pacífica del espacio se ha mantenido vivo gracias a escritores como John Wilkins, obispo de Chester, con su *Descubrimiento de un mundo*, de 1638, o H.G. Wells, con *El primer hombre en la Luna*, de 1901. El escritor francés Julio Verne fue el primero que imaginó algo sorprendentemente similar a lo que ha ocurrido realmente en el siglo xx. En su libro *De la Tierra a la Luna*, publicado en 1865, describe el lanzamiento de un misil puesto en órbita alrededor de nuestro satélite.

¿Quién hubiera imaginado, hace un cuarto de siglo, cuando Europa dio los primeros pasos, tan inseguros, hacia una cooperación intergubernamental, que se convertiría en una de las tres mayores potencias espaciales del mundo?

LOS PRIMEROS PASOS

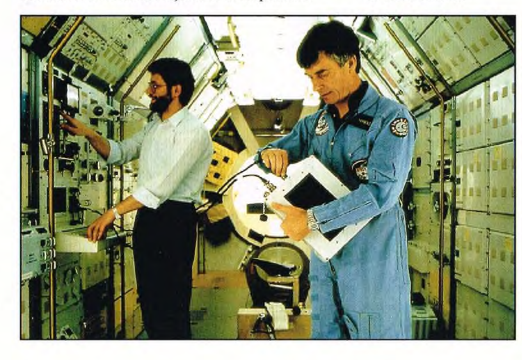
Indudablemente, Europa es hoy un socio importante en los programas internacionales con tripulación humana. Además, científicos, políticos y todos cuantos toman las decisiones en el mundo industrial han comprendido que una tarea intergubernamental e interdisciplinaria de grupo es fundamental para tener éxito en una misión tan comprometida como es la exploración y el aprovechamiento del espacio.

El 6 de julio de 1964, desde Cerdeña, se lanzó con éxito el primer cohete-sonda, el Skylark, de la ESRO (organización europea para la investigación espacial), uno de los organismos precursores de la ESA, que se fundó en 1964 junto con la ELDO (organización europea para el desarrollo de lanzadores). La carga útil de aquel primer cohete-sonda era un microcosmos de aquella naciente organización: los dos experimentos procedían de Alemania y Bélgica; el cohete utilizado era británico; los componentes del grupo, alemanes, austríacos y franceses; la carga útil había sido reunida por los Países Bajos; y la base de lanzamiento, lo mismo que gran parte del personal encargado de la operación, era italiana. Luego, el cuartel general de la ESA se estableció en París, y las instalaciones técnicas fueron distribuidas por toda Europa; una política que ha permitido distribuir los dividendos obtenidos en forma de mejoras en la cooperación



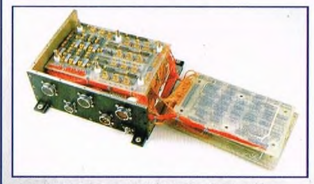
Arriba, una fotografía aérea muestra toda el área del centro de investigaciones y tecnologías espaciales (ESTEC) de Noordwijk, en Holanda.

Abajo, interior del centro ESA, de Colonia (Alemania), donde algunos astronautas están efectuando pruebas de adiestramiento.



OTROS PROYECTOS

La ESA construyó y lanzó con éxito la plataforma reutilizable EUREKA, cuya finalidad era llevar a cabo experimentos de microgravedad durante un largo período. La plataforma fue llevada al espacio y, más tarde, devuelta a la Tierra al cabo de casi un año, por un transbordador estadounidense.



En la foto superior, electrónica de a bordo de la plataforma EUREKA 1.

tecnológica, industrial y política. La actividad de los cohetes-sonda ha llevado a la construcción de la base de lanzamiento espacial (ESRANGE) de Kiruna, al norte de Suecia.

Arriba, un modelo de Ariane 5, destinado a poner en órbita el avión espacial Hermes.

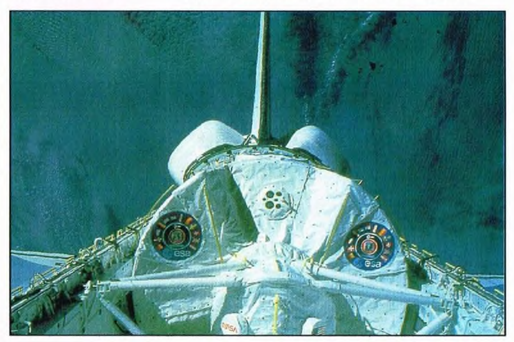
DE LOS COHETES-SONDA A LOS LANZADORES DE LA SERIE ARIANE

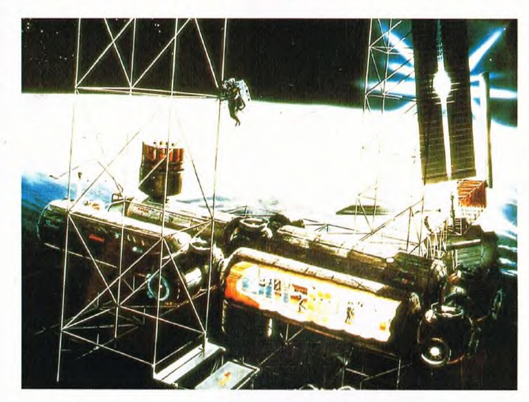
Actualmente, el estudio, proyecto, desarrollo y experimentación se llevan a cabo en el ESTEC (centro europeo de investigación y tecnología espacial), de Noordwijk (Holanda). El ESTEC dispone de la mayor planta de prueba, el simulador espacial. Después del lanzamiento, los satélites son controlados por el personal del ESOC (centro europeo de operaciones espaciales), ubicado en Darmstadt (Alemania). El ESOC dispone de una sala de control especial para los satélites Meteosat, y es responsable de algunas instalaciones de control de la ESA en tierra. Finalmente, se creó el ESRIN (antes instituto europeo para la investigación espacial), con sede en Frascati, en los alrededores de Roma. Alberga el IRS (servicio de búsqueda de informaciones), el sistema informatizado de documentación más potente de Europa, y la Earthnet, que recoge, elabora y distribuye imágenes y datos procedentes de los satélites de teledetección. En 1964, la ESRO se ocupaba exclusivamente de la investigación mediante programas como el ESRO-1A y 1B, que estudiaban la ruta hacia la Tierra de las partículas solares que atraviesan la magnetosfera. Dado el interés creciente que suscitaba el espacio, en 1973 se decidió constituir una Agencia Espacial Europea (ESA) única. Fue durante este año decisivo cuando la agencia desarrolló su propia capacidad de lanzamiento. El nuevo lanzador recibió el nombre de Ariane, tomado de la leyenda griega según la cual Ariadna, mediante un hilo, guió a Teseo hasta sacarlo del laberinto. La familia de lanzadores Ariane ha permitido a Europa efectuar hasta el momento presente decenas de lanzamientos coronados por el éxito. Durante la reunión ministerial celebrada en La Haya en noviembre de 1987, la ESA decidió desarrollar el Ariane 5, un lanzador para cargas pesadas, capaz de garantizar un alto nivel de seguridad en las misiones espaciales, con tripulación a bordo, y cuyo primer lanzamiento con éxito sucedió en octubre de 1997.

Abajo, un hermoso plano del laboratorio espacial europeo SPACELAB mientras es puesto en órbita por el transbordador espacial de la NASA.

DEL SPACELAB AL COLUMBUS

La ESA tuvo sus primeras experiencias en el campo de los vuelos espaciales con tripulación humana gracias al afortunado vuelo del Spacelab, el primer laboratorio orbitante reutilizable del mundo. Efectuó su primera misión a bordo del transbordador espacial estadounidense entre el 28 de noviembre





La astronomía de infrarrojos permite a los científicos estudiar los objetos celestes a partir de su emisión de infrarrojos. A pesar de que pueden hacerse observaciones desde tierra a través de las diferentes ventanas atmosféricas, las medidas de unos 20 micrómetros a mayores longitudes de onda han de efectuarse desde el espacio. Éstos son algunos de los proyectos científicos realizados en el pasado por la ESA. De los otros se hablará más adelante.

Hay que recordar que, hasta ahora, la ESA ha puesto en órbita numerosos satélites para comunicaciones terrestres y marítimas, y otros para el estudio ambiental y las previsiones meteorológicas.



y el 8 de diciembre de 1983. Ulf Merbold fue el especialista en cargas útiles de esta primera misión, en la cual, de los 38 experimentos, 26 estaban patrocinados por la ESA, y los 12 restantes por la NASA. Tales experimentos incluían tanto la observación de la emisión de rayos X por el Sol como la de la energía de los rayos cósmicos. Luego siguieron otras misiones del Spacelab. Preparada con esta experiencia, Europa se está dedicando a la construcción del COF (Columbus Orbital Facility), el módulo-laboratorio que se ensamblará con la estación espacial Alpha.

Arriba, el dibujo muestra cómo podría ser la estación espacial, parte del programa Columbus.

Al lado y abajo, el astronauta de la ESA Ulf Merbold adiestrándose con el simulador Spacelab y en servicio a bordo del Spacelab-1, en el centro de Colonia (Alemania).

LAS FIRMAS ESPECTRALES EN EL ESPACIO

COS-B fue el primer satélite lanzado por la ESA (9 de agosto de 1975) con un lanzador Delta desde la base de Vanderberg para estudiar los rayos gamma, la radiación electromagnética más potente del universo, con una longitud de onda inferior a una milmillonésima de centímetro, más corta incluso que la de los rayos X. El satélite tenía una vida prevista de dos años, pero funcionó correctamente durante seis años y ocho meses, hasta el 26 de abril de 1982. El estudio de los objetos celestes a partir de su emisión de rayos X constituye una parte importante de la astronomía moderna. El primer satélite de rayos X de la ESA, el EXOSAT, fue lanzado el 26 de mayo de 1983 desde cabo Cañaveral con un lanzador Delta para medir con espectrómetros la intensidad de las fuentes de rayos X de diferentes longitudes de onda. El EXOSAT reveló la presencia de hierro fuertemente ionizado en las masas galácticas. Después de 2.000 observaciones puestas a disposición de los astrónomos de todo el mundo, el EXOSAT volvió a entrar en la atmósfera terrestre el 6 de mayo de 1986. El satélite IUE, un proyecto conjunto de la ESA, la NASA y el Consejo de Investigación Científica Británico, fue lanzado el 26 de junio de 1978 para estudiar la radiación ultravioleta de las estrellas, los cuásares y las galaxias. Siempre en el ámbito del programa científico, la ESA puso en órbita, en 1995, el observatorio espacial infrarrojo (ISO).





EN EL PRÓXIMO NÚMERO

EL SISTEMA SOLAR

EL INTERIOR DEL SOL

ESTRELLAS Y GALAXIAS

LA FORMACIÓN DE LAS GALAXIAS

GUÍA DE LAS CONSTELACIONES

EL DRAGÓN

CÓMO FUNCIONA EL UNIVERSO

REACCIONES NUCLEARES EN LAS ESTRELLAS

LA EXPLORACIÓN DEL ESPACIO

SOHO: HACIA EL CORAZÓN DEL SOL

EL UNIVERSO

ENCICLOPEDIA DE LA ASTRONOMÍA Y EL ESPACIO

18



$ 3,90

PLANETA DeAGOSTINI



COMPOSICIÓN DE LA OBRA

Volumen 1	Fascículos 1	al	16
Volumen 2	Fascículos 17	al	32
Volumen 3	Fascículos 33	al	48
Volumen 4	Fascículos 49	al	64
Volumen 5	Fascículos 65	al	80

VENTA EN QUIOSCOS

Pida a su proveedor habitual que le reserve un ejemplar de EL UNIVERSO. Adquiriéndolo todas las semanas en el mismo punto de venta facilitará la distribución y obtendrá un mejor servicio.
Las tapas correspondientes a cada volumen se ponen a la venta con el fascículo que cierra el tomo. Con dicho fascículo se entregan las portadillas correspondientes.

Presidente: José Manuel Lara
Director General: Carlos Fernández
Director Editorial: Virgilio Ortega
Director General de Producción: Félix García
Coordinador General: Carles Dorico

© Editorial Planeta Argentina S.A.I.C.
Av. Independencia, 1668 - Capital Federal
Servicio de atención al cliente: Tel. (01) 482 - 0655 y 482 - 0657
Distribuye: Capital: Huesca-Sanabria,
Baigorri, 103, Capital Federal,
Interior: D.G.P., Alvarado, 2118, Capital Federal

© Editorial Planeta Mexicana, S.A. de C.V.
Av. Insurgentes Sur # 1162 - México D.F.
Servicio de atención al cliente: Tel. 575 13 48

© Editorial Planeta Colombiana, S.A.
Carrera, 68, n.º 25-55 - Santa Fé de Bogotá, D.C.
Servicio de atención al cliente: Tel. 9800 - 15315

© Editorial Planeta Chilena, S.A.I.C.
Olivares, 1229 - Santiago de Chile

ISBN Obra completa (con vídeo): 84-395-4148-1
Obra completa (sin vídeo): 84-395-4138-4
Fascículos (con vídeo): 84-395-4149-X
Fascículos (sin vídeo): 84-395-4139-2
Depósito legal: B-47.097-1997

Impresión: Cayfosa, Santa Perpètua de Mogoda, Barcelona
Impreso en España - Printed in Spain - Mayo 1998

Los editores se reservan el derecho de modificar el precio de venta de los componentes de la colección en el transcurso de la misma, si las circunstancias así lo exigieran.
Los editores garantizan la publicación de todos los fascículos que componen esta obra.

Fotografías: Lee Gibbons: cubierta, 116-117, 116ab., 117ar.; ESA/SPL: 107c.der.; E.T. Archive: 106ar.; Galaxy Picture Library: 101, 104, tercera de cubiertas; IGDA: 107ar.der.; Science Photo Library/Julian Baum: 106-107; Dr. Jeremy Burgess: 103 der.; Range: 111; Hugh Rowland: 110; Spectrum: 110, 111; US Naval Observatory: 112ar.izq.; Bristock-IFA: 114-115; BNSC/ESA: 118ab.; ESA: 118-119, 119ab., 120c.; Tony Stone Picture Library: 120ab.
Dibujos: Robin Carter/WLAA: 104-105, 117ab.; David A. Hardy: 102-103; Hugh Rowland: 105, 106ab., 120; Katz: 108-109; Sandra Russell/Black Hat: 112ar.; Julian Baum: 113; Farroxs: 116ar.; Robin Bottel: 115ab.; Spectrum Picture Library: 114ab.

EL INTERIOR DEL SOL

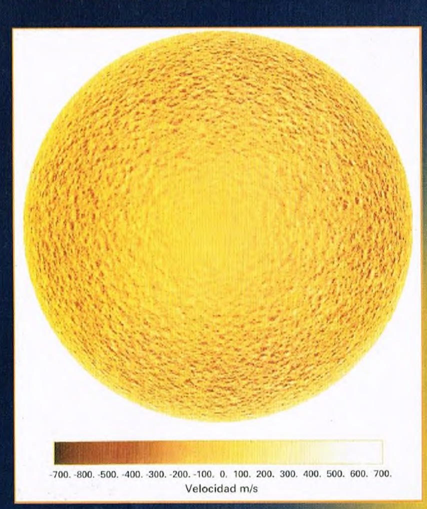
Podemos estudiar la superficie de nuestra estrella. Pero, ¿cómo es su interior?



El Sol es el astro que hace posible el desarrollo de la vida en nuestro planeta. Por ello es importante conocer la estructura de la fuente que emite la energía indispensable para nuestra existencia y para la de todo ser vivo. Por desgracia, las regiones del Sol más accesibles a las observaciones son las más externas, dado que no podemos dirigir la mirada a las zonas más internas del astro. Esto se debe a que el material que forma el

Abajo, la vida en la Tierra depende de la energía que fluye continuamente del Sol. Esta energía hace posible el mantenimiento de una temperatura constante, el ciclo del agua y la transformación de sustancias inútiles y nocivas en otras indispensables para la vida gracias a la fotosíntesis que realizan las plantas.

Conocemos con suficiente precisión la superficie del Sol, en la que podemos distinguir distintas estructuras, como las manchas visibles en la fotografía de esta página. En cambio, nos resulta imposible escrutar el interior de nuestra estrella. Para comprender cómo funciona debemos construir modelos.



A la izquierda, la sonda SOHO tomó esta imagen del Sol en la que se registran las velocidades de acercamiento o alejamiento de porciones de la superficie solar. Analizando imágenes como ésta se puede averiguar de qué modo se propagan las ondas de tipo sísmico dentro de la estrella y, por tanto, deducir su estructura.

Zona radiativa

Núcleo

Sol no es transparente a las radiaciones, luminosas u otras, emitidas por su interior. No obstante, es posible realizar suposiciones razonables acerca de lo que sucede en el interior del Sol.

PRESIÓN Y DENSIDAD

En primer lugar, los estratos más internos del Sol deben soportar la presión de los más externos, que literalmente «pesan» sobre ellos. Por ello, cuanto más nos adentremos en el Sol, mayor será la presión de las capas superiores, cada vez más gruesas. En consecuencia, la primera idea que podemos tener acerca del interior del Sol es que su presión aumenta a medida que lo hace la profundidad. También aumenta la densidad de la materia a causa de la creciente compresión.

TEMPERATURA

Se podría preguntar, llegados a este punto, qué impide al Sol hundirse sobre sí mismo. Para explicar por qué no ocurre esto, hay que hacer consideraciones sobre la temperatura. Podemos partir de las observaciones realizadas en la superficie del Sol, que indican valores de la temperatura comprendidos entre 5.000 y 6.000 K. Como sabemos que los gases comprimidos se calientan, podemos imaginar que hacia el interior de nuestra estrella la temperatura aumenta. Y efectivamente, esto es lo que ocurre.

DATOS

NÚCLEO DEL SOL

TEMPERATURA:
Núcleo: 15.000.000 °C
Zona radiativa: 5-1.000.000 °C
Zona convectiva:
1.000.000 °C - 5.700 °C
DENSIDAD
Núcleo: de 100 a 30 g/cm³
Zona radiativa: de 30 a 0,1 g/cm³
Zona convectiva: menos de 0,1 g/cm³

SUBDIVISIÓN EN TRES ZONAS

La estructura interna del Sol no puede verse porque todo lo que procede del interior es apantallado a causa de lo que sucede en las regiones más externas. Sin embargo, es posible imaginar qué ocurre bajo la superficie. Nuestra estrella puede dividirse en tres zonas: el núcleo, donde tiene lugar la producción de energía, la capa radiativa, en la cual la energía es transportada por los fotones, y la capa convectiva, que se extiende hasta la superficie, donde grandes remolinos vuelven a mezclar el material solar llevando la materia más caliente en contacto con la zona radiativa hacia las regiones externas más frías.

Zona convectiva

Granulación fotosférica

Células convectivas

Éste es el mecanismo que puede explicar la estabilidad del Sol. Es de sentido común que un gas caliente ejerce una presión mayor que otro frío. Para cerciorarse de ello basta medir la presión de los neumáticos de un automóvil cuando están fríos y después de haber recorrido unos cuantos kilómetros. El cuadro que podemos esbozar es el siguiente: la presión debida a la alta temperatura del gas interior equilibra la presión gravitacional de las capas más externas. ¿Pero cuál es la temperatura del interior del Sol? A partir del modelo de estrella que hemos elaborado, podemos calcular que la temperatura cerca del centro debe girar en torno a decenas de millones de grados. En tales condiciones son posibles las reacciones de fusión entre los núcleos de los átomos de hidrógeno.

EL NÚCLEO DEL SOL

En el centro del Sol, las temperaturas son elevadísimas, tanto, que son posibles reacciones de fusión nuclear. Esto es así porque el movimiento desordenado de los núcleos derivado de las altas temperaturas (la llamada agitación térmica) es suficiente para vencer la repulsión que impide la unión entre cargas del mismo signo. Mediante unas reacciones complicadas, cuatro núcleos de hidrógeno (cuatro protones) se unen dando como producto un núcleo de helio (formado por dos protones y dos neutrones), dos positrones (electrones positivos), dos neutrinos (dotados de una masa pequeñísima) y energía en forma de rayos gamma y de energía cinética (energía de movimiento) de las partículas producidas. La energía generada mantiene caliente el Sol y lo lleva a expandirse como un gas dentro de un globo aerostático. Pero la expansión lleva a un enfriamiento del núcleo, de tal modo que las capas exteriores vuelven a presionar sobre las interiores, el núcleo de nuevo se comprime y se mantiene caliente. El equilibrio entre la presión de las capas externas del Sol y la debida al calor de las zonas más internas es tan estable

A la derecha, los «granos de arroz», vértices de las células convectivas que emergen a la superficie, vistos al telescopio. El diámetro medio de un «grano de arroz» es de unos 1.000 kilómetros.

que nuestra estrella se encuentra en estas condiciones desde hace unos cinco mil millones de años y así seguirá por igual tiempo hasta que se agote el combustible nuclear que contribuye al mantenimiento de las altas temperaturas del núcleo.

LA CAPA RADIATIVA

Como hemos dicho, las reacciones nucleares que tienen lugar en la parte más interna del Sol producen, entre otras cosas, rayos gamma. Éstos tenderían a dirigirse hacia el exterior de la estrella si el núcleo estuviera «desnudo», pero la presencia de estratos superiores obstaculiza su camino hacia el espacio. Los rayos gamma son absorbidos una y otra vez a energías inferiores por la materia que encuentran en su camino. Como el Sol tiene un radio de unos 700.000 km y las reacciones nucleares tienen lugar en las regiones más internas de nuestra estrella, el camino que deben recorrer los rayos gamma es muy largo. Los procesos de absorción y reemisión son tan frecuentes que la energía emitida en forma de rayos gamma tarda millones de años en llegar a la superficie. Esto significa que la luz que nos llega hoy del Sol nació del calor desarrollado en su interior hace millones de años. Teniendo en cuenta que el tiempo necesario para que un rayo de luz procedente del Sol llegue a la Tierra es de ocho minutos, todo esto puede parecer muy extraño: ¿cómo puede ser que para recorrer una distancia 200 veces mayor la radiación tenga necesidad de un tiempo inconmensurablemente más breve? La explicación reside en que entre el Sol y la Tierra está el vacío, por lo que la luz del Sol puede viajar sin perturbaciones, mientras que en el interior del Sol, la materia, como hemos visto, es muy densa, razón por la cual un fotón que parte de su interior sufre un número altísimo de colisiones antes de poder salir del astro.

LA CONVECCIÓN

La convección es un fenómeno muy extendido en la naturaleza. Se produce cuando una masa de fluido calentada por debajo tiene encima una capa del mismo fluido más fría y más densa. El fluido más caliente asciende y el más frío cae hasta entrar en contacto con la fuente de calor. Análogamente con lo que sucede al poner una olla al fuego, se produce una continua mezcla en el medio calentado. En el dibujo de la derecha se representa el movimiento del agua calentada dentro de las células convectivas.



LA CAPA CONVECTIVA

A medida que los fotones gamma sufren procesos de colisión, van perdiendo energía. En un cierto punto, su energía, inicialmente muy superior, se vuelve igual a la energía térmica de la materia solar. En física se dice entonces que la materia y la radiación están en equilibrio. En dirección a las capas externas, más frías, la materia se vuelve opaca a la radiación y obstaculiza cada vez más su camino. En este punto cobra importancia el fenómeno conocido como convección. En las zonas que rodean al núcleo, los rayos gamma eran los principales responsables del transporte de energía producida por las reacciones nucleares hacia el exterior de la estrella, precisamente porque en cierto sentido estaban más calientes que la materia que encontraban. Ahora, en cambio, la materia y la radiación tienen la misma temperatura, pero la radiación no consigue filtrarse, por lo que buena parte de la energía que fluye hacia el exterior la transporta la materia. Para comprender cómo ocurre esto, pensemos en lo que sucede cuando se pone a calentar agua en una olla: el calor calienta el agua del fondo, haciendo que se dilate; el agua caliente dilatada es más ligera que el agua más fría y densa que se encuentra

El interior del Sol está atravesado por campos magnéticos que emergen a la superficie. En algunas zonas, las líneas de fuerza del campo magnético se hacen más densas, afloran a la superficie y arrastran consigo parte de la materia solar; se forman así las protuberancias solares, chorros de gas incandescente que emergen temporalmente del disco solar para volver a caer después a la superficie.



A la izquierda, la corona es un tenue halo de gas muy caliente que rodea al Sol; los mecanismos que la calientan están ligados a la cesión de energía transportada por ondas sonoras y corrientes eléctricas generadas en el interior del astro. A la derecha, el Sol fotografiado con rayos X por el Skylab; los rayos X que nos llegan del Sol proceden de la corona que lo envuelve.



en la superficie. Por ello el agua caliente empieza a subir y el agua fría desciende hasta el fondo. Se forma la llamada célula convectiva, en la cual el calor es transportado desde las zonas más calientes –el fondo de la olla– a las más frías por la materia más caliente en movimiento. Lo mismo ocurre en el Sol, en las capas situadas debajo de la superficie. En el límite de la zona radiativa, la situada alrededor del núcleo, donde la radiación transporta la energía, es como si la materia estuviera sometida por debajo a un foco de calor, constituido por los rayos gamma procedentes del núcleo y debilitados por el paso a través de la capa radiativa. Esta fuente de calor hace que la materia se expanda, por lo que se crea un sistema de células convectivas en el que el gas más profundo asciende hacia la superficie; allí se enfría y vuelve hacia el interior. La sección del Sol situada encima de la capa radiativa se mezcla continuamente debido a estos movimientos convectivos. Convección significa «transporte colectivo», lo que indica que las masas de fluido se mueven juntas llevando consigo el calor. ¿Hasta dónde ascienden estas células convectivas? Evidentemente, las células pueden existir hasta que la materia conserva una cierta densidad y se presenta como un fluido; por lo tanto, tienen que llegar hasta la zona en la que el material del Sol no está demasiado enrarecido, es decir, hasta la superficie. De hecho, telescopios de aficionados de tamaño suficiente (desde unos 20 cm de diámetro) muestran que la superficie del Sol se caracteriza por la llamada granulación, formada por numerosísimos «granos de arroz», como les llamó el primero que los observó, que cambian de forma en pocos minutos. Estos granos no son otra cosa que las partes más altas de las células convectivas más externas.

ONDAS SÍSMICAS Y CAMPOS MAGNÉTICOS

La visión de la granulación solar es una prueba concreta de la existencia de movimientos de convección, y por tanto de transporte de energía térmica (calor) hacia el exterior. No obstante, hay otros modos de emitir energía al espacio que pueden dar ulteriores informaciones sobre lo que sucede en el interior del Sol. La materia solar, dada su alta temperatura, se encuentra en estado de plasma, un estado en el que los electrones pueden circular libremente porque han dejado de estar ligados a los iones positivos; es posible, entonces, que se generen intensas corrientes eléctricas, las cuales, a su vez, producen campos magnéticos. Dado que un campo magnético funciona como un acumulador de energía, cuando emerge a la superficie puede liberar la energía que contiene. Y esto es lo que se observa. Sabemos que el Sol alberga campos magnéticos y que éstos son más intensos cerca de las manchas; observamos además la generación de protuberancias y podemos relacionar estas formaciones con el movimiento de los campos magnéticos hacia el exterior del Sol; las protuberancias, por tanto, permiten liberar parte de la energía contenida en los campos.

Otro modo de transferir energía hacia el exterior del Sol es la generación de ondas de tipo acústico que, producidas por debajo de la superficie del Sol, transportan energía; esta energía se cede al gas situado encima de la fotosfera, aumentando su temperatura. Los estudios sobre la superficie del Sol se beneficiarán de las observaciones realizadas por la sonda Soho.

LOS NEUTRINOS, MENSAJEROS DEL NÚCLEO

La única partícula que logra pasar indemne a través de las gruesas capas que rodean el núcleo del Sol y consigue llegar hasta nosotros sin sufrir perturbaciones es el neutrino, la más ligera de las partículas. No obstante, precisamente por la dificultad de que los neutrinos interactúen con la materia que atraviesan, detectar estas partículas es una empresa ardua. Para conseguirlo se construyen gigantescos detectores, de tal modo que la gran cantidad de materia facilite la reacción entre los neutrinos y el detector; estos aparatos se sitúan bajo imponentes montañas (como el laboratorio de la fotografía, colocado en una mina abandonada en Estados Unidos) o en el fondo del mar.

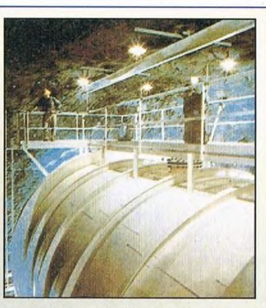


Imagen que muestra el imponente equipo de un detector de neutrinos.

LA FORMACIÓN DE LAS GALAXIAS

Las galaxias, agregados de miles de millones de estrellas, cambian muy lentamente, pues durante miles de millones de años permanecen iguales. Pero también ellas han tenido un origen, a menudo violento, controlado por la fuerza de la gravedad.









Arriba: una serie de dibujos que representan las etapas de la historia del universo:
1) Big Bang
2) Universo primordial opaco
3) Formación de las galaxias
4) El universo se expande
5) ¿Volverá a contraerse el universo?



Las galaxias, tal como podemos observarlas hoy, figuran entre los objetos celestes más fascinantes: nos muestran figuras, simetrías y estructuras especiales que se extienden a lo largo de decenas de miles de años luz.

Después del descubrimiento del astrónomo Edwin Hubble (1923), que situaba la galaxia de Andrómeda fuera de la nuestra, la Vía Láctea, los astrónomos empezaron a catalogar estos objetos celestes, como hacen los botánicos con las nuevas plantas. La gran distinción entre galaxias elípticas, espirales e irregulares propuesta por el mismo Hubble fue un primer hito en la comprensión de su historia. Pero el éxito, en los años cincuenta, de la teoría del Big Bang situó a los astrónomos ante la idea de que, tiempo atrás, el universo estaba más contraído y denso, y que tenía un límite de tiempo. Todo lo que existe en este universo tiene necesariamente una vida limitada. Más tarde, el descubrimiento de los cuásares, núcleos de galaxias lejanas donde se produce una enorme emisión de energía, demostraba que al menos algunas galaxias, en el pasado, fueron notablemente diferentes de los objetos que estamos acostumbrados a ver hoy.

En los años sesenta, la radiación cósmica de fondo fue por fin encontrada; Penzias y Wilson, mientras estaban probando nuevos tipos de antenas para las transmisiones de radio, la observaron a longitudes de onda de las microondas. Esta radiación es la imagen más lejana del universo que se puede observar por medio de radiaciones electromagnéticas. Más lejana quiere decir también más antigua, de cuando el universo era realmente joven. Inmediatamente después del Big Bang, en efecto, la altísima temperatura ionizaba los átomos, por lo que los electrones no podían ligarse a los núcleos. Esto hacía que el gas no fuese transparente a la radiación y que el universo primordial no fuese visible.

Aquel universo jovencísimo era completamente uniforme; se trataba de un universo sin estrellas, sin galaxias, carente de cualquier tipo de estructura. La atención de los astrónomos pasó de la observación a la teoría. ¿Cómo era posible que un universo tan regular se hubiera convertido en un espectáculo de formas y colores, de galaxias en movimiento y estrellas agrupadas en cúmulos, galaxias y cúmulos de galaxias?

PERTURBACIONES Y GRAVEDAD

También la superficie del mar, si se ve desde bastante lejos un día de calma, tiene la apariencia homogénea y sin movimiento que debió de tener el universo después del Big Bang. Pero observándolo desde más cerca nos damos cuenta de que la quietud absoluta no existe ni en el mar ni en ningún lugar del cosmos. La densidad del universo primordial presentaba pequeñas fluctuaciones, pequeñas perturbaciones debidas al incesante movimiento de las partículas de materia y radiación que viajaban a la velocidad de la luz gracias a su temperatura altísima. Era un gas en continua agitación, como las olas que suben y bajan cuando se las contempla desde una barca mar adentro. Una misma fuerza, la fuerza de la gravedad, juega a construir y a destruir aquello que las perturbaciones tratan de formar. El agua del mar que se alza es inevitablemente reconducida hacia abajo por su propio peso y el mar reconquista todas sus olas: en este caso, la gravedad amortigua y destruye todas las perturbaciones que crea el movimiento interno del agua. En el universo, en cambio, las perturbaciones de densidad que continua y casualmente se creaban tenían a la gravitación de su parte: cuando alcanzaban un tamaño suficiente, la fuerza de atracción de su propia masa proseguía el trabajo y ayudaba a las perturbaciones a concentrarse y recoger materia circundante. Las concentraciones de materia, que primero fueron casuales, aumentaron de tamaño

GALAXIAS PRIMORDIALES

Se cree que las galaxias empezaron a formarse unos 1.000 millones de años después del Big Bang. Actualmente, el proceso prácticamente ha cesado y las galaxias, con todos sus constituyentes, envejecen lentamente.

La fotografía muestra los objetos más lejanos jamás observados con luz visible. Se trata de un conjunto de galaxias de diversas formas y edades fotografiadas por el telescopio espacial Hubble en una dirección en que los telescopios situados en tierra no ven ningún objeto brillante. Para obtener esta fotografía el telescopio Hubble ha apuntado en la misma dirección durante 10 días, observando el aspecto de galaxias lejanísimas, cuando se encontraban todavía en una fase de formación.

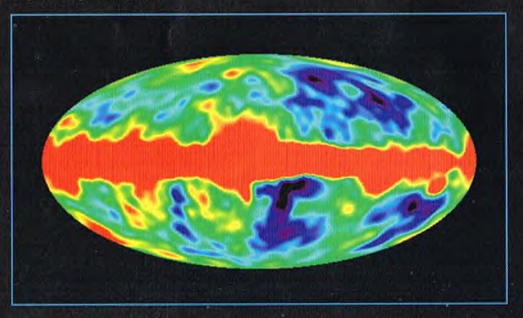
y crearon en el universo heterogeneidades que han perdurado hasta el tiempo presente.

Pero distintas teorías de la evolución térmica del universo llevan a distintas historias de formación de las galaxias y de los sistemas estelares en general. Dos escenarios principales han sido la base de las teorías más en boga en los últimos decenios. La temperatura del universo provoca el movimiento de las partículas, con el consiguiente aumento de presión. Esta presión es la contrapartida de la fuerza de la gravedad y tiende a expandir lo que la gravedad crea y a destruir las estructuras que se están formando. Por tanto, es necesaria una gran fuerza de atracción, que se traduce en una gran masa o tamaño de la perturbación que está tratando de crecer, para vencer la fuerza de la presión interna.

En la llamada teoría jerárquica de la formación de las galaxias: las estructuras que primero se forman son aquellas cuya masa gira en torno al millón de masas solares, una masa necesaria para construir objetos similares a los cúmulos globulares que conocemos, formados por cientos de miles de estrellas. Las masas más pequeñas son destruidas por la presión del gas y las más grandes son demasiado lentas para concentrarse en un volumen restringido y dejar que actúe la fuerza de la gravedad. Las estructuras del tamaño de una galaxia se forman, pues, por agregación de estructuras más pequeñas. Los cúmulos globulares se funden para formar cúmulos mayores hasta llegar al tamaño de unos cien mil millones de estrellas, que es el de las galaxias mayores que se observan.



El proyecto APM (Automated Plate Measuring, medida automática de placas fotográficas) corre a cargo del departamento de astrofísica de la Universidad de Oxford (Gran Bretaña). La figura muestra los más de dos millones de galaxias que se han descubierto analizando 185 placas fotográficas que cubren una décima parte de la bóveda celeste. Se observan las concentraciones representadas por los cúmulos de galaxias y la estructura filamentosa que une gran parte de las galaxias. A ellas se contraponen regiones, llamadas vacíos, en las que la densidad de galaxias es bajísima.



El satélite artificial COBE fue puesto en órbita con objeto de medir la radiación cósmica de fondo en el intervalo de las microondas y el infrarrojo lejano. Un instrumento capaz de detectar diferencias de temperatura del cosmos de diezmilésimas de grado ha permitido elaborar el mapa reproducido en la figura. Se observa ante todo la banda horizontal, en el centro, debida a la emisión de nuestra propia Galaxia. En los dos hemisferios se pueden ver pequeñas perturbaciones de la temperatura que no son otra cosa que la primera fotografía de las heterogeneidades del universo, gérmenes de las galaxias y los cúmulos de galaxias que vemos hoy.

El paso siguiente es la reunión de galaxias en cúmulos y grupos de galaxias, que agrupan decenas, cientos e incluso miles de galaxias, como ocurre en el cúmulo galáctico de la Cabellera de Berenice, cerca de nuestra Vía Láctea. Por este motivo se usa el término «jerárquico», que indica un modo de crear objetos cada vez mayores; se llega así finalmente a las estructuras mayores de todo el universo, los supercúmulos de galaxias, donde decenas de cúmulos de galaxias, junto a cientos o miles de grupos más pequeños y galaxias aisladas, permanecen unidos por la fuerza de la gravedad, extendiéndose a lo largo de millones de años luz.

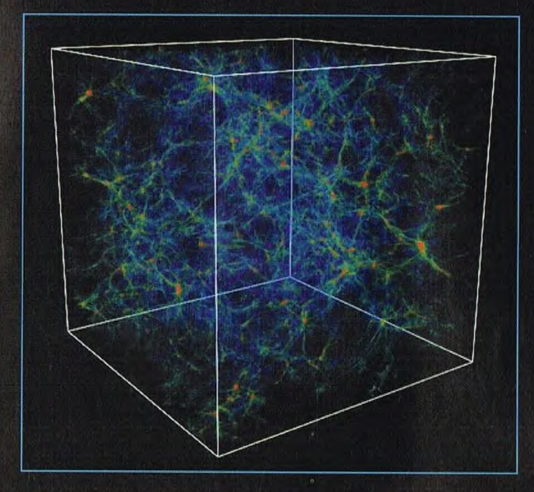
Otro punto de vista es el de la formación de las estructuras más pequeñas por fragmentación de las mayores. La escuela que ha desarrollado esta teoría tiene como principal artífice al astrónomo soviético Zeldovich. La teoría de la evolución térmica del universo predice la formación, en primer lugar, de los supercúmulos, miles de billones de masas solares que colapsan venciendo la presión del gas o de la radiación. En aquella época, masas de esta entidad ocupaban extensiones enormes y se resentían muchísimo de la expansión del espacio causada por el impulso inicial del Big Bang. La expansión tenía aquí un enemigo suplementario que combatir: la expansión general que obligaba a la gran estructura que estaba formándose a aplanarse en una dirección, formando una capa de material denso en vez de una gran esfera, como sucedía con los cúmulos globulares.

Más tarde, la capa de materia apenas creada fue obligada a contraerse en otra dirección, por lo que se formaron filamentos, una especie de cigarros de millones de años luz de longitud. Con el paso del tiempo estos filamentos se fragmentaron en unidades más pequeñas dando vida a los cúmulos de galaxias.

Sólo en una última etapa emergieron de la nube de gas las galaxias aisladas, que se hicieron visibles al formarse las estrellas luminosas.

LA CONTRASTACIÓN DE LAS TEORÍAS

Sólo en los últimos veinte años ha sido posible construir las bases observacionales para una auténtica verificación de las teorías. Y sólo en años muy recientes los grandes telescopios terrestres



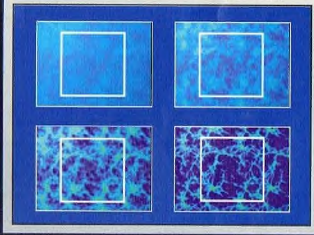
Arriba, una representación bidimensional de la distribución en el espacio de algunos millones de galaxias. Se observan estructuras filamentosas que rodean grandes espacios vacíos.

y las incomparables prestaciones del telescopio espacial Hubble han permitido una verdadera observación directa de las galaxias jóvenes. En 1980, el astrónomo estadounidense Dressler estableció con precisión la existencia de una relación entre el tipo de galaxia (elíptica, espiral) y el punto en el cual está situada, la llamada relación morfología-densidad. Hay más galaxias elípticas dentro de los cúmulos de galaxias que fuera de ellos, mientras que el resto del espacio lo dominan las galaxias espirales e irregulares. Esta diversidad debe ser explicada por una teoría de la formación de galaxias. Está claro que en el escenario de la fragmentación la galaxia nace después de la construcción del cúmulo, por lo que es posible que el medio ambiente influya en el tipo de galaxia que se está formando. Además, los filamentos predichos de modo natural por esta teoría se observan efectivamente en los mapas galácticos construidos sobre la base de las observaciones.

No obstante, estos argumentos a favor de la teoría de Zeldovich han sido neutralizados por las observaciones del telescopio espacial Hubble, que ha fotografiado galaxias elípticas por completo semejantes a las que se encuentran en nuestras proximidades pero que se hallan a una distancia que corresponde a una época de sólo dos mil millones de años después del Big Bang. La implicación es todavía mayor, pues para ver la galaxia formada son necesarios por lo menos mil millones de años después de su nacimiento, por lo que la época de formación de las galaxias elípticas observadas por el Hubble es de mil millones de años después del Big Bang. La teoría de la fragmentación ha quedado así descartada y los científicos del instituto de Baltimore que gestiona el telescopio están convencidos de que ahora le corresponde a la teoría seguir el ritmo al que prosiguen las observaciones, cada vez más alejadas en el espacio y el tiempo.

GALAXIAS POR ORDENADOR

Utilizando los potentes ordenadores de tres universidades estadounidenses reunidas en el consorcio GC3, un grupo de científicos ha elaborado la teoría de la evolución de las estructuras filamentosas del universo. Se trata de la mayor simulación jamás intentada en el campo de las aplicaciones astronómicas; sus resultados concuerdan satisfactoriamente con las observaciones, ora de las galaxias que emiten en la luz visible, distribuidas en cúmulos y filamentos, ora de la luminosidad en los rayos X del núcleo de los cúmulos de galaxias, donde el gas calentado a la temperatura de 1.000 millones de grados emite una gran cantidad de rayos X. Actualmente es más fácil encontrar nuevos cúmulos de galaxias con las observaciones de los pocos satélites en órbita que escrutan el cielo en esta radiación que con todos los grandes telescopios presentes en la superficie terrestre. Las cuatro imágenes inferiores se han tomado de una película que muestra la evolución de un universo casi uniforme, que pasa de la formación de las primeras estructuras concentradas a la construcción de zonas superdensas (cúmulos de galaxias) y de estructuras filiformes (filamentos de galaxias observados en las grandes investigaciones cosmológicas).



En esta simulación se indican con falsos colores las distintas densidades del gas que está colapsando para formar galaxias. Bertschinger y su grupo de colaboradores han realizado simulaciones que han dado como fruto la creación de galaxias elípticas a partir de la fusión de otras más pequeñas.

DISTINTAS GENERACIONES DE ESTRELLAS

La diversidad entre tipos de galaxias no se limita al aspecto externo. Los astrónomos llaman

poblaciones estelares a grupos de estrellas formadas en el mismo momento. En general, se distingue entre la población I, formada recientemente y que todavía está produciendo nuevas estrellas, y la población II, la de las estrellas nacidas hace mucho tiempo, tal vez un millón de años después del Big Bang (téngase en cuenta que ahora han transcurrido unos 15.000 millones de años desde el momento en que comenzó el universo).

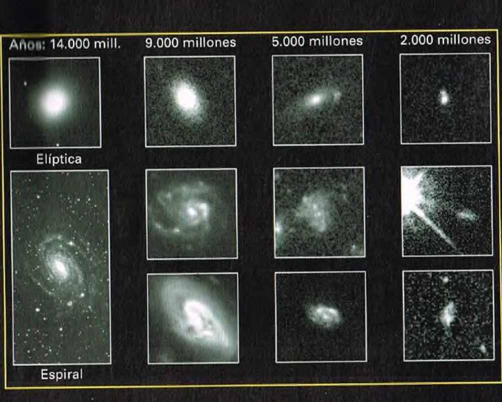
Por lo tanto, en las galaxias hay estrellas de casi 14.000 millones de años y estrellas jóvenes. Las dos poblaciones se pueden distinguir por el color, porque las estrellas viejas son por término medio más rojas que las jóvenes, de las cuales sobrevive todavía una fracción de gigantes de color azul, y por la composición química. Un conjunto de estrellas que nace al comienzo del universo debe necesariamente estar compuesto por material formado por el calor del Big Bang, cuando todavía no había elementos como el hierro o el oxígeno. Pero las estrellas grandes mueren pronto y en la fase final de su vida algunas estallan formando oxígeno y hierro que envían al espacio. En los miles de millones de años que siguen, y todavía hoy, las estrellas se forman con material lleno de estos nuevos elementos (como nuestro planeta Tierra, que es rico en estos elementos y en otros metales).

Las observaciones efectuadas, incluso con pequeños telescopios, han mostrado que las galaxias elípticas están formadas por estrellas de la población II, viejas y rojas, mientras que el disco de las galaxias espirales es todavía azul, con estrellas de la población I que todavía se están formando.

Podemos imaginar, por tanto, que las piezas principales para la construcción de las galaxias elípticas son las primeras estructuras que se forman, construyendo con estrellas de la población II conjuntos de cerca de un millón de estrellas. Las galaxias van formándose poco a poco por agregación de conjuntos más pequeños hasta llegar a cientos de miles de millones de estrellas, como en las grandes galaxias elípticas. En algunos casos, sin embargo, el gas que se contrae para formar nuevas estrellas tiene y conserva un momento angular (una rotación en torno a un eje), lo que impide una contracción violenta y veloz de la materia. El gas permanece inutilizado en grandes cantidades y puede formar estrellas durante toda la vida de la galaxia, desde su nacimiento pocos miles de millones de años después del Big Bang hasta hoy, tal y como sucede en los discos de las galaxias espirales, como la de Andrómeda o la Vía Láctea.

Los dos ingredientes finales son la masa oscura y los encuentros entre dos o más galaxias.

La masa oscura se encuentra en cualquier sistema gravitacionalmente ligado de nuestro universo. En nuestra Galaxia, por ejemplo, existe por lo menos tanta materia oscura como materia visible en forma de estrellas luminosas. Esta materia no emite ningún tipo de radiaciones luminosas pero participa en la cohesión de la galaxia con su propia



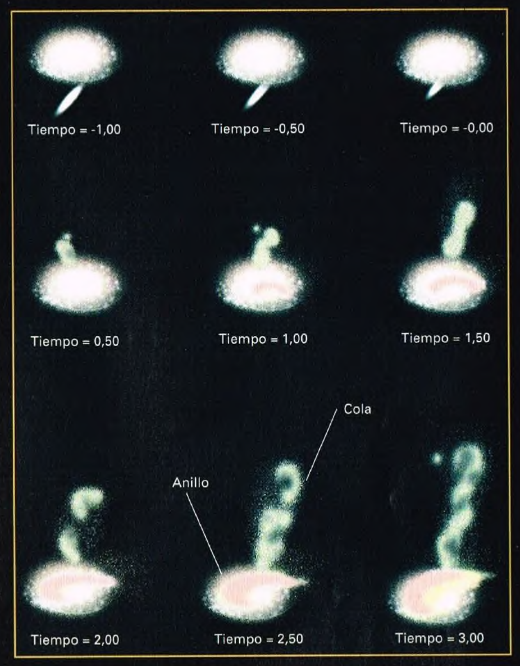
Se puede conseguir una comparación directa entre el pasado y el presente, es decir, entre la juventud y la edad adulta de las galaxias, a través de estas imágenes que confrontan galaxias con un corrimiento hacia el rojo, y por tanto una velocidad de alejamiento conocido. La ley de Hubble liga directamente esta velocidad con la distancia de las galaxias, por lo que es posible determinar la edad de los objetos observados. La figura muestra los distintos tipos de galaxias, elípticas y espirales, descubiertas en cúmulos de galaxias a una distancia de nosotros que corresponde a edades de 14, 9, 5 y 2 mil millones de años después del Big Bang. Se observan las galaxias elípticas jóvenes, muy parecidas a las modernas. Las progenitoras de las galaxias espirales, en cambio, están distorsionadas, probablemente debido a encuentros con otras galaxias o a efectos de marea gravitacional causada por el entero cúmulo de galaxias.




En las dos imágenes inferiores, dos pares de galaxias en interacción. A la izquierda, NGC 2207 e IC 2163; a la derecha, NGC 4038 y NGC 4039. Las interacciones entre galaxias han tenido gran importancia en la determinación de la forma y el destino de dichos objetos.



Arriba, se ve la galaxia NGC 6438. Su extraña forma se debe probablemente al encuentro con otra galaxia que fue «canibalizada».



En la secuencia de imágenes de arriba, representación de una simulación por ordenador del choque entre dos galaxias. Se observa que la galaxia mayor, inicialmente elíptica, adopta después del encuentro una forma vagamente espiral; la más pequeña, en cambio, adquiere una forma irregular.

fuerza gravitatoria. Se ha supuesto que en el universo joven fue precisamente este tipo de materia oscura el que formó las primeras perturbaciones de densidad media y que la materia ordinaria, que más tarde formó las estrellas, cayó en el pozo gravitacional creado por la materia oscura. El origen y la constitución de la materia oscura es todavía uno de los misterios que muchos investigadores tratan de resolver.

FABRICANTES DE UNIVERSOS

Las últimas fronteras de la investigación astronómica sobre el origen y la formación de las galaxias y las estructuras a más gran escala (cúmulos y supercúmulos de galaxias, filamentos y grandes zonas vacías) requieren el concurso de los ordenadores más potentes que se han construido. La idea consiste en simular, a través de unos programas cada vez más sofisticados, la acción de las fuerzas que han modelado el universo. Los investigadores que se interesan por estas simulaciones intentan describir matemáticamente las fuerzas de interacción debidas a la gravedad, a la presión del gas, al transporte de energía de la radiación luminosa y a la presencia de la misteriosa materia oscura.

A partir de la configuración inicial, elegida con precisión sobre la base de las recientes teorías, se deja que la materia se mueva libremente de tal modo que cada partícula, gas ordinario y materia oscura, sufra la atracción gravitacional de todas las demás.

La dificultad consiste en tener que hacer evolucionar en pocos días un universo que ha tardado miles de millones de años en adoptar el aspecto actual.

La habilidad de los científicos reside en la capacidad de incluir en el programa el mayor número posible de interacciones físicas para que la simulación sea realista y en crear programas cada vez más veloces o en conectar en paralelo muchos ordenadores para acelerar los cálculos.

El objetivo final consiste en hallar las condiciones iniciales correctas y la justa combinación de materia oscura y ordinaria para obtener, cuando la simulación haya realizado cálculos por un equivalente de 15.000 millones de años, una imagen del universo simulado lo más parecida posible al universo observado.



A la izquierda, imagen en colores artificiales de un cúmulo de galaxias.

EL DRAGÓN

La constelación del Dragón parece abrazar la región del polo Norte celeste.



El Dragón es una antigua constelación de considerables dimensiones que, a latitudes como la de España, es circumpolar.

Así como la vecina Osa Menor contiene el polo Norte celeste, el Dragón contiene otro punto astronómico relevante: el polo norte de la eclíptica. Este punto es el centro de la circunferencia descrita por el polo Norte celeste en 26.000 años debida al movimiento de precesión del eje terrestre.

LOCALIZACIÓN

A pesar de su gran extensión, la constelación del Dragón no contiene estrellas muy luminosas; la parte más fácilmente identificable es la cabeza, representada por un cuadrilátero de estrellas situado entre las constelaciones de Hércules y de la Osa Menor. El resto de la constelación se encuentra a occidente de este asterismo, entre las dos osas.

ESTRELLAS PRINCIPALES

Alfa (magnitud 3,7), o Thuban, es una estrella bastante insignificante porque, pese a identificarse por medio de la primera letra del alfabeto griego, no figura entre las más brillantes de la constelación. En torno al 2700 a.C. esta estrella estaba en las proximidades del polo Norte celeste, por lo que en aquel momento era la estrella Polar. Paulatinamente, la precesión de los equinoccios fue llevando el polo cada vez más lejos de Thuban y actualmente la Polar es la estrella Alfa de la Osa Menor. Dentro de 21.000 años este papel será recuperado por Thuban.

La estrella más luminosa del Dragón es Gamma (magnitud 2,2), llamada también Eltanin, en la cabeza del Dragón. También esta estrella tiene una importancia histórica, ya que cuando Bradley la observaba, descubrió en 1795 el fenómeno de la aberración de la luz.



LOS MITOS Y LAS ESTRELLAS

EL DRAGÓN

El Dragón celeste, según la tradición, representa al guardián del jardín de las Hespérides, un jardín famoso por el árbol de las manzanas de oro, regalo recibido por Juno con motivo de su boda con Júpiter. Entre los trabajos que tuvo que afrontar Hércules figura el de robar algunas manzanas de oro, para lo cual tuvo que enfrentarse al dragón. En la lucha, el héroe dio muerte al monstruo con flechas envenenadas; ambos fueron colocados en la misma región del cielo, con Hércules aplastando la cabeza del Dragón. Corresponde a Juno el mérito de haber puesto en el cielo a uno de los dos personajes, el dragón que vigilaba su árbol.



Arriba, la forma redondeada de NGC 6543 permite identificar fácilmente este objeto como una nebulosa planetaria. Es una de las más brillantes de todo el cielo, con una magnitud 9.

Mu es un sistema de dos estrellas de magnitud 5,8 que orbitan la una alrededor de la otra en pocos cientos de años.

Más fácil de identificar es el sistema doble de Nu, un par de estrellas blancas de luminosidad casi igual (magnitud 4,9). Para resolver sus dos componentes bastan unos prismáticos.

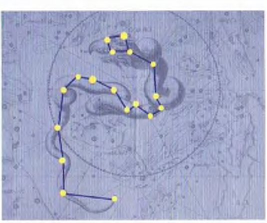
Escrutando con unos prismáticos la estrella 39 *Draconis* se verá un par formado por una estrella amarilla de magnitud 5 y otra azul de 7; el mismo sistema, observado con un telescopio de unos 100 aumentos, muestra la presencia de una tercera estrella de magnitud 7,7 situada en las proximidades de la componente más luminosa: 39 *Draconis*, por tanto, es un sistema triple.

Existe otro sistema triple que también merece mención: 16-17 *Draconis*. También en este caso los prismáticos muestran dos estrellas de quinta magnitud, mientras que un telescopio permite separar el tercer miembro del terceto, de magnitud 6,6.

OBJETOS DEL DRAGÓN

El Dragón contiene un solo objeto digno de interés para quien posea instrumentos de tamaño medio o pequeño: la nebulosa planetaria NGC 6543.

Como todos los objetos de este tipo, es una nube producida por una estrella que ha llegado al crepúsculo de su existencia. Con el combustible nuclear reducido al mínimo, esta estrella pierde las capas más externas de gas, generando la nebulosa y dejando el núcleo prácticamente despojado y visible al telescopio. La estrella de magnitud NGC 6543 es precisamente lo que queda de la estrella que dio origen a la nebulosa planetaria. En el Dragón también es visible uno de los objetos del catálogo de Messier: M102, una galaxia visible casi de perfil.

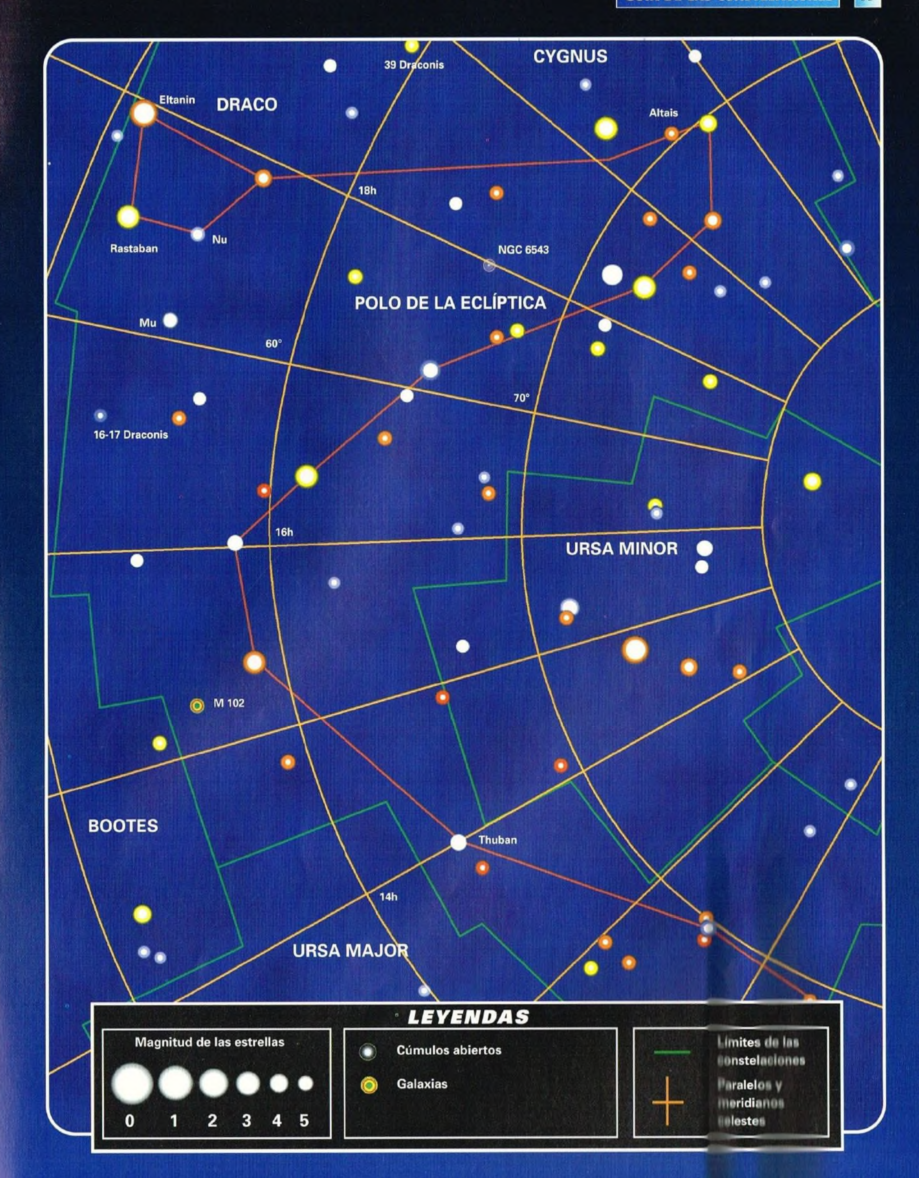


Arriba, la antigua constelación del Dragón, que surca el cielo entre las dos osas, cerca del polo Norte celeste.

DÓNDE BUSCARLA

EL DRAGÓN

La constelación del Dragón abarca una región del cielo comprendida entre 47° N y 86° N de declinación, y entre 9 horas 20 minutos y 20 horas 40 minutos de ascensión recta.
Es íntegramente visible todo el año desde latitudes más al norte de 43° N y parte del año desde las regiones comprendidas entre 43° N y 4° S.
Por debajo de 4° S nunca es íntegramente visible.


CYGNUS
39 Draconis
Eltanin
DRACO
Altais
18h
Rastaban
Nu
NGC 6543
POLO DE LA ECLÍPTICA
Mu
60°
70°
16-17 Draconis
16h
URSA MINOR
M 102
BOOTES
Thuban
14h
URSA MAJOR
LEYENDAS
Magnitud de las estrellas
0 1 2 3 4 5
Cúmulos abiertos
Galaxias
Límites de las constelaciones
Paralelos y meridianos celestes

REACCIONES NUCLEARES EN LAS ESTRELLAS

Las condiciones extremas de presión y temperatura en el interior de las estrellas permiten a los átomos unirse entre sí para formar nuevos elementos químicos.



Los alquimistas medievales buscaban la piedra filosofal, un hipotético material que les permitiera transmutar un elemento en otro, especialmente el hierro en oro. Naturalmente, no la encontraron, como tampoco tuvieron éxito en otros muchos experimentos. Actualmente, los físicos nucleares y los astrónomos saben que las transformaciones de esta clase pueden ocurrir en la naturaleza, aunque sólo en condiciones especiales de temperatura y de presión, dentro de las estrellas.

COMBINAR LOS ELEMENTOS

Como todos sabemos, el agua está formada por dos elementos químicos, el hidrógeno y el oxígeno. Estos dos elementos, tomados por separado, se presentan a temperatura ambiente en forma gaseosa. Si se hacen reaccionar en un recipiente, se forman gotitas de agua líquida. Se ha producido una reacción química.

En este tipo de reacciones los elementos se combinan para formar nuevas sustancias completamente distintas de las de origen. En el ejemplo citado dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno gaseosos se combinan para formar una molécula de agua líquida.

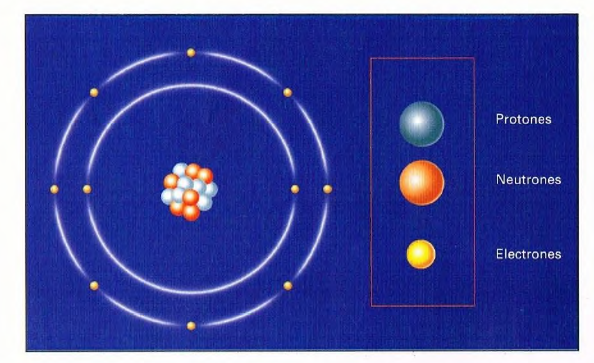
Existen en la naturaleza 92 tipos distintos de elementos, clasificados por los químicos en la llamada tabla periódica de los elementos. Todo cuanto conocemos (los planetas, las estrellas, los muebles de nuestras casas, nosotros mismos) está formado por combinaciones de ellos en varias proporciones. Los elementos químicos se pueden presentar en estado puro (hidrógeno, oxígeno, carbono, hierro) o unidos formando sustancias más o menos complejas (el agua, las plantas, los plásticos, el cuerpo humano).

Lo característico de las reacciones químicas, sin embargo, es que los elementos no pierden completamente su identidad sino que todavía son reconocibles y pueden separarse de nuevo; por ejemplo, a partir del agua se puede obtener hidrógeno y oxígeno. Además, muchas de estas reacciones se producen con facilidad, sin necesidad de condiciones especialmente favorables.

LA CONSTITUCIÓN DE LOS ÁTOMOS

Existen otros tipos de reacciones entre los elementos: las nucleares. Es útil recordar cómo están formados los átomos, los

Las reacciones nucleares liberan grandes cantidades de energía, que a veces no se utilizan con fines pacíficos. Las bombas nucleares están basadas en reacciones de fisión o de fusión.



constituyentes fundamentales de la materia. En un átomo hay un núcleo que contiene un cierto número de protones, partículas cargadas positivamente, y de neutrones, partículas neutras. A su alrededor orbitan los electrones (que están cargados negativamente), los cuales, en un átomo neutro, existen en número igual al de protones del núcleo. Es precisamente el número de protones lo que define el tipo de átomo; por ejemplo, el hidrógeno, el elemento más simple, tiene 1 protón; el oxígeno tiene 8, el hierro, 26, el oro, 79, etc. En las reacciones químicas estos números no cambian; los átomos se combinan manteniendo invariable el número de protones y conservando por ello su identidad.

LAS REACCIONES NUCLEARES

En las reacciones nucleares, en cambio, los átomos cambian sustancialmente porque se modifican sus núcleos. Existen dos tipos de reacciones nucleares, las de fisión y las de fusión. En las primeras, ciertos átomos muy pesados, como el del uranio, se escinden en fragmentos más pequeños, mientras que en las segundas ciertos átomos ligeros se unen para formar otros más pesados. Pero estas reacciones no se producen fácilmente. Los elementos «se defienden» en cierto sentido y tratan en lo posible de no sufrir modificaciones. Son necesarias fortísimas presiones y altísimas temperaturas, de decenas o cientos de millones de grados, para que los núcleos se acerquen y se produzca la fusión nuclear.

A la derecha, los átomos, en las reacciones químicas, se unen para formar sistemas más complejos: las moléculas. En el dibujo vemos la molécula de agua, constituida por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno.

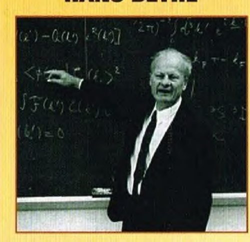
El átomo está formado por varias partículas elementales. En la parte central, el núcleo, se encuentran los protones, cargados positivamente, y los neutrones, que carecen de carga eléctrica. Alrededor del núcleo orbitan los electrones. A las altísimas temperaturas de los interiores estelares, sin embargo, estos electrones son arrancados de los núcleos y se encuentran en estado libre.

Está claro, por esta razón, que las reacciones nucleares no son fáciles de llevar a cabo artificialmente; en la Tierra, sólo en tiempos muy recientes los científicos han conseguido construir enormes y complejos aparatos donde producirlas: los reactores nucleares. Los reactores de fisión están en uso desde hace mucho tiempo para la producción de energía eléctrica, mientras que los de fusión se encuentran todavía en fase experimental.

Pero las reacciones nucleares de fusión también tienen lugar en la naturaleza, en

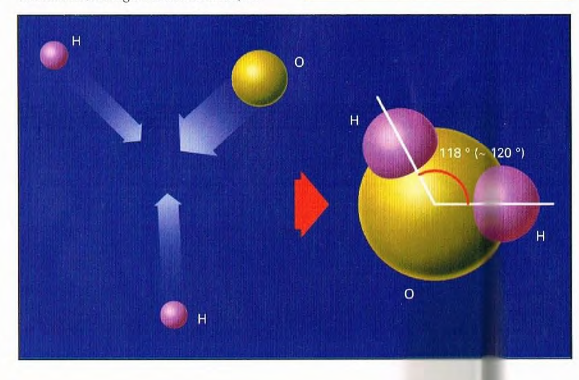
PERSONAJES

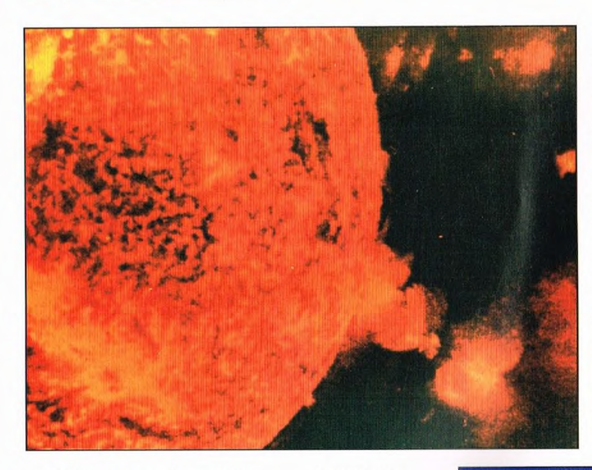
HANS BETHE



NACIDO EN 1906

Hans Bethe nació en 1906 en Estrasburgo, entonces Alemania, desde donde emigró a causa de la persecución nazi durante la segunda guerra mundial, refugiándose en Estados Unidos. Autor de numerosos estudios sobre los rayos cósmicos (contemporáneamente al físico alemán von Weizsäcker), sostuvo que había un modo de que las estrellas pudieran transformar hidrógeno en helio con liberación de una gran cantidad de energía. Conjeturó la existencia de una serie de reacciones nucleares, conocidas como ciclo del carbono, o también como ciclo de Bethe-Weizsäcker. Bethe dio inicio al moderno estudio de la evolución estelar. Junto a Ralph Alpher y George Gamow contribuyó a la elaboración de la teoría del Big Bang y estudió la formación de los elementos químicos en los primeros instantes de vida del universo. Le fue concedido el premio Nobel de física de 1967.





A la izquierda, el Sol es nuestra estrella y suministra la energía necesaria para la vida en la Tierra. Esta energía es el fruto de miles de millones de reacciones de fusión nuclear que se producen en cada instante en su núcleo.

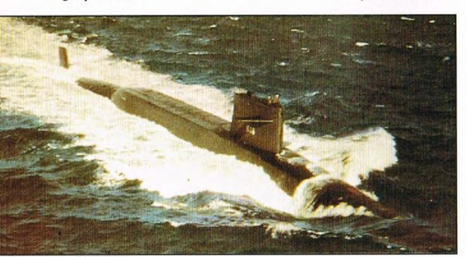
cantidad muy superior a lo que cabría pensar, dentro de todas las estrellas, porque ésta es su fuente de energía.

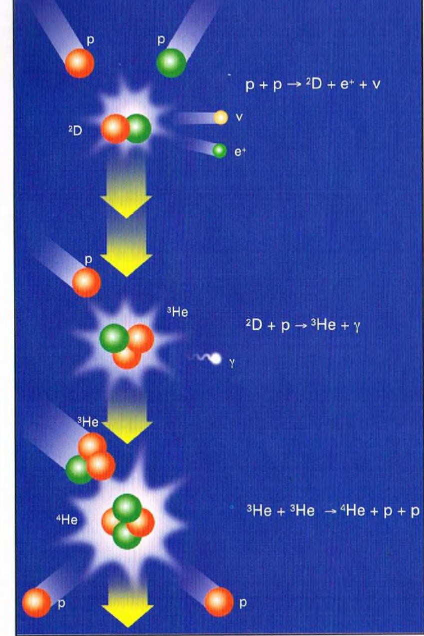
EL ENCUENTRO ENTRE DOS NÚCLEOS

La reacción nuclear más sencilla es aquélla en que se combinan dos núcleos de hidrógeno, es decir, dos protones; esta reacción, llamada protón-protón, se produce a una temperatura del orden de 10-20 millones de grados (a tales temperaturas los átomos están «desnudos», privados de sus electrones, que han sido arrancados de los núcleos por el enorme calor; por esto, más que de átomos se habla de núcleos). Los dos protones se unen entre sí y forman un nuevo núcleo, el de deuterio, además de un positrón (un electrón positivo) y un neutrino, una partícula minúscula sin masa o casi. El deuterio es un tipo especial de hidrógeno en cuyo núcleo, además de un protón, hay un neutrón; es lo que se llama un isótopo del hidrógeno. Seguidamente, un núcleo de deuterio se une con un protón y forma un núcleo de helio-3, un isótopo inestable del helio. Por último, dos núcleos de helio-3 se unen dando un núcleo de helio-4 (estable) y dos protones, que quedan libres para reemprender la reacción desde el comienzo.

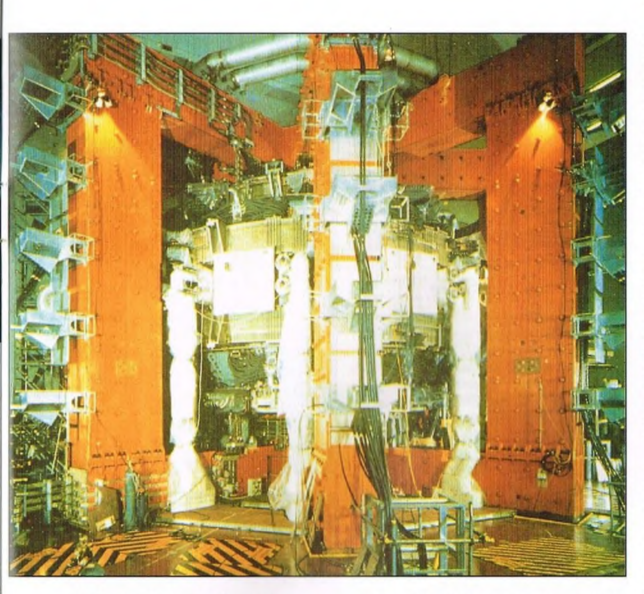
Lo importante en esta reacción es que libera una gran cantidad de energía. Para cada núcleo de helio que se forma se producen 26,7 millones de electrones-voltio (el electrón-voltio es la energía que adquiere

Abajo, el hombre aprovecha la energía nuclear para poner en movimiento los grandes submarinos militares. Gracias a dicha fuente de energía, estos aparatos pueden moverse velozmente y permanecer sumergidos durante largos períodos.





Representación esquemática de la reacción protón-protón. Al comienzo, dos protones se unen formando un núcleo de deuterio (D) y emitiendo un neutrino (ν) y un positrón (e^+). El deuterio se une con otro protón formando un núcleo de ^3He y liberando energía en forma de rayos gamma (γ). Por último, dos núcleos de ^3He se unen formando un núcleo de ^4He y liberando dos protones, que vuelven a empezar el ciclo.



Arriba, los reactores nucleares son unos aparatos que permiten producir reacciones nucleares en la Tierra. Por desgracia, los reactores actualmente en funcionamiento están basados en las reacciones de fisión, que utilizan elementos muy radiactivos y por lo tanto peligrosos, como el uranio y el plutonio. Cuando se logren construir reactores de fusión se dispondrá de una fuente casi inagotable de energía.

un electrón al ser acelerado por una diferencia de potencial de un voltio). Y reacciones como ésta se producen miles de millones de veces cada segundo dentro de las estrellas.

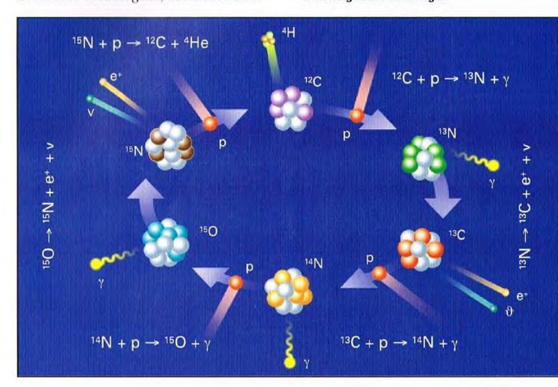
EL CICLO DEL CARBONO

Existe otro modo de producir helio a partir de núcleos de hidrógeno, con una serie de reacciones más complejas, llamado ciclo del carbono. Este ciclo requiere una temperatura ligeramente mayor que la reacción protón-protón. Se produce, pues, en estrellas más masivas; es necesaria además la presencia de otros elementos químicos, como el carbono, que actúan como catalizadores para favorecer las distintas reacciones. De todos modos, el resultado es siempre el mismo: se produce un núcleo de helio-4 a partir de simples protones y se obtiene una gran cantidad de energía.

Ulteriores reacciones pueden llevar, en las estrellas muy masivas, a la formación de los demás elementos químicos, más pesados que el carbono, como el oxígeno, el azufre, el cloro, etc., hasta el hierro, el vigésimo sexto elemento de la tabla periódica. Aquí la serie de reacciones se interrumpe, porque para producir núcleos más pesados que el hierro es necesario suministrar energía; se trata, por tanto, de reacciones endotérmicas, que absorben energía del medio, a diferencia de las precedentes que son exotérmicas.

HIJOS DE LAS ESTRELLAS

Por medio de las reacciones nucleares, las estrellas pueden producir nuevos elementos químicos a partir de los más simples, como el hidrógeno. Dicha nucleosíntesis estelar es el único proceso que los científicos han hallado para explicar la formación de los elementos presentes en la naturaleza. Las implicaciones de este hecho son extraordinarias: todo átomo de cualquier elemento químico distinto del hidrógeno o del helio se ha formado dentro de una estrella en un pasado más o menos remoto. Cualquier átomo de carbono o de oxígeno que se encuentra en nuestro cuerpo fue formado dentro de una estrella que, acabando su existencia mediante una gigantesca explosión como supernova, lo lanzó al espacio interestelar. Luego, junto con ingentes cantidades de otros átomos, gas y polvo, este átomo ha formado las grandes nubes de las que nació nuestro sistema solar y todos los objetos que contiene, incluido nuestro planeta y nuestro cuerpo. Se puede decir que a todos los efectos somos hijos de las estrellas.



Representación esquemática del ciclo del carbono. En el centro y arriba, un núcleo de ^{12}C absorbe un protón transformándose en ^{13}N; luego, el ^{13}N, inestable, se desintegra en ^{13}C. Éste, uniéndose con un protón, se convierte en ^{14}N, el cual, absorbiendo otro protón, se transforma en ^{15}O. Este último se desintegra en ^{15}N, el cual, por último, con la absorción de otro protón se transforma en un núcleo de ^{12}C y uno de ^{4}He. Con el núcleo de ^{12}C vuelve a empezar el ciclo. C es el carbono; N, el nitrógeno; O, el oxígeno; He, el helio; e^{+}, un positrón; υ, un neutrino; y γ, energía en forma de rayos gamma.

SOHO: HACIA EL CORAZÓN DEL SOL

Para escuchar el canto del Sol, la Agencia Espacial Europea, en colaboración con la NASA, ha construido una sonda que está estudiando nuestro astro a 1.500.000 km de la Tierra. Este canto contiene los secretos del corazón del Sol.



Uno de los descubrimientos más sorprendentes acerca de nuestro Sol, realizado por los astrónomos en las últimas décadas, es que emite una especie de canto. Las notas, sin embargo, son demasiado graves para que pueda escucharlas un oído humano y sobre todo no pueden atravesar el espacio interplanetario.

Pero los astrofísicos han hallado la manera de detectar los movimientos rítmicos de la superficie del Sol producidos por la reflexión de las ondas sonoras en el interior de nuestro astro.

Las oscilaciones de la superficie poseen frecuencias bien definidas, como si fueran notas musicales, y su análisis nos ofrece nuevas e importantes informaciones sobre la estructura del Sol.

En 1995, la sonda SOHO, de la Agencia Espacial Europea y de la NASA, construida para el estudio del Sol, fue colocada a 1.500.000 km de la Tierra, en un punto donde la gravedad terrestre y la solar tienen la misma intensidad.

Uno de los objetivos principales de SOHO, acrónimo de Solar and Heliospheric Observatory, es el de registrar, como si fuera un instrumento de alta fidelidad, el canto de nuestro Sol. Además, otros instrumentos a bordo de la sonda recogerán todas las informaciones necesarias para comprender los procesos que calientan la atmósfera solar exterior y dan fuerza al viento solar. SOHO tendrá la misión ulterior de recoger muestras de este viento solar para estudiarlo y tratar de comprender cómo influye sobre el medio ambiente terrestre.

LA HISTORIA DE SOHO

Los estudios para la construcción de SOHO comenzaron en 1984, aunque la estructura final del satélite tal como fue lanzado se definió sólo en 1991.

Por un acuerdo suscrito por la ESA y la NASA, se eligió el lanzador Atlas-IIAS como cohete para llevar a SOHO hasta un punto del espacio, llamado L1 o punto de Lagrange nº 1, donde la fuerza gravitacional del Sol es exactamente equilibrada por la terrestre.

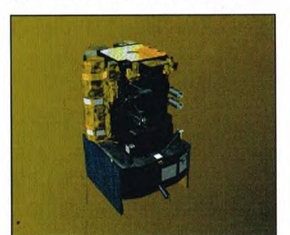
En dicho punto, la trayectoria de la sonda forma una especie de aureola en torno a la Tierra mientras la acompaña en su revolución anual alrededor del Sol. La posición, además, es estratégica para que la sonda pueda observar ininterrumpidamente nuestro astro. En otras palabras, para SOHO no existe la noche.

Esta pequeña estación espacial automática está controlada por el Goddard Space Center de la NASA, donde llegan los datos recogidos por las estaciones terrestres por medio del Deep Space Network. En el caso de que sobrevinieran problemas que impidieran a SOHO descargar inmediatamente los datos recogidos, un ordenador de a bordo permitiría conservarlos en su interior durante 48 horas sin perderlos. SOHO ha sido programada para observar directa e ininterrumpidamente el Sol sin mover los ojos de su telescopio una cantidad superior a diez milésimas de grado. También en este caso, sofisticados ordenadores guían al satélite artificial en el mantenimiento de una perfecta posición espacial.

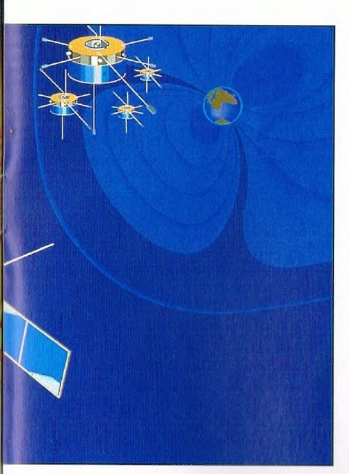




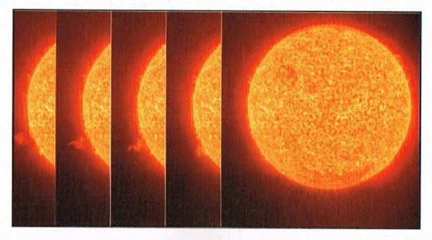
Arriba, a la derecha, el cuerpo de la sonda con la carga científica a la vista. En las dos imágenes inferiores, la sonda SOHO antes del lanzamiento y, a la derecha, con los paneles abiertos en posición operativa.







En este dibujo de la ESA se representan SOHO y Cluster, protagonistas del programa europeo Horizon 2000. Los Cluster quedaron destruidos junto con el Ariane.



A la derecha, cinco imágenes del Sol con luz ultravioleta tomadas el 11 de febrero de 1996 por el telescopio EIT, a bordo de la sonda SOHO. Abajo, dibujo que representa a SOHO en el espacio, obtenido mediante simulación por ordenador.

LA SONDA

SOHO está formada por dos módulos principales. El módulo de servicio constituye la parte inferior del satélite y se encarga del suministro de energía, del control térmico, de la orientación y de las telecomunicaciones con la Tierra; además, constituye el soporte de los paneles solares. El segundo módulo está encima del anterior y alberga todos los instrumentos científicos.

LA CARGA CIENTÍFICA

GOLF y VIRGO son dos instrumentos que detectan ininterrumpidamente las oscilaciones de todo el disco solar, midiendo respectivamente la velocidad y la radiación emitida. Estos estudios permitirán obtener precisas informaciones sobre las zonas de convección del Sol.

SUMMER, CDS, EIT, UVCS y LASCO, en cambio, son combinaciones de telescopios, espectrómetros y coronógrafos que observan la caliente atmósfera del astro y su corona. Los tres primeros instrumentos estudian las partes internas de la corona y los otros dos la externa. Su cometido consiste en medir la temperatura, la densidad y la composición y en seguir con altísima resolución la evolución de las estructuras que se forman en la superficie solar.

Otros tres instrumentos, llamados respectivamente CELIAS, COSTEP y ERNE, analizan directamente en el espacio las características de las partículas cargadas del viento solar.

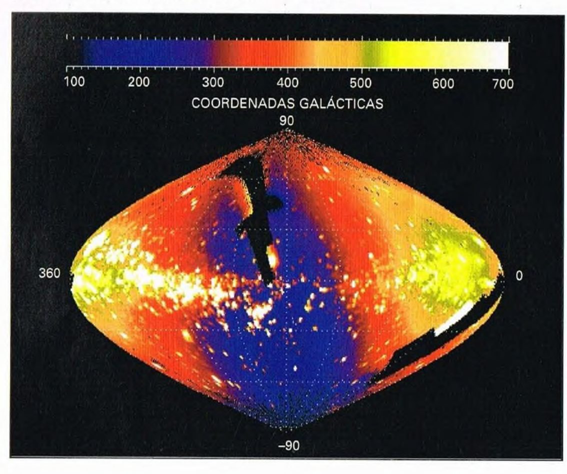
SWAN, por último, realiza un mapa de la densidad del hidrógeno en la heliosfera a una distancia de 10 diámetros solares.



LA HELIOSISMOLOGÍA: APRENDER DEL CANTO DEL SOL

Las oscilaciones de la superficie visible del Sol permiten ver lo que está debajo de la máscara de la cara visible del astro. La técnica es similar a la sismología, que utiliza las ondas de los terremotos para poner de manifiesto los distintos estratos de que se compone el interior de la Tierra. Pero las oscilaciones de la superficie solar permiten también definir con precisión la velocidad de rotación de la propia superficie, que se reduce del ecuador a los polos.

La heliosismología pretende además comprender mejor la dinamo interior del Sol que genera el campo magnético externo.



A la derecha, una proyección tridimensional de los alrededores del Sol tomada por el Solar Wind Anisotropies, telescopio de luz ultravioleta que estudia el comportamiento de los átomos de hidrógeno (energía absorbida/energía emitida) para la observación del viento solar.

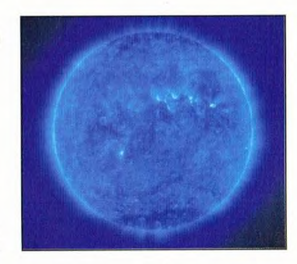
EN QUÉ LUGARES DE LA TIERRA SE ESTUDIA LA HELIOSISMOLOGÍA

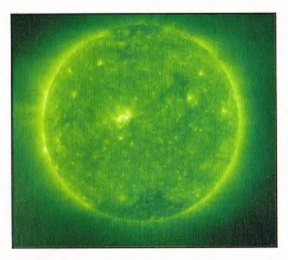
Aunque la heliosismología es una ciencia muy joven, ya hay algunos centros de investigación que la han convertido en su objetivo científico. Hay seis lugares de la Tierra considerados como los más importantes por los medios y el personal que emplean. Son los siguientes:

• El Big Solar Observatory (California, EE UU): se encuentra a 2.067 m de altura sobre una isla del lago artificial de San Bernardino, en el sur de California, y forma parte del California Institute of Technology.

• El Mauna Loa Solar Observatory (Hawai, EE UU): se encuentra a una cota de 3.533 m encima de un campo de lava del volcán Mauna Loa, en las islas Hawai. Forma parte del National Center for Atmospheric Research en Boulder, Colorado.

• El Learmonth Solar Observatory (Australia): se encuentra a 10 m sobre el nivel del mar en las costas occidentales del golfo de Exmouth y está administrado por el IPS Radio and Science Services de Chastwood, en Nueva Gales del Sur, y por la U.S. Air Force.





Arriba, dos imágenes del Sol tomadas por el telescopio EIT, en las cuales se puede observar la emisión de gas por parte de la corona solar.

• El Udaipur Solar Observatory (India): situado a 750 m de altura en una región semiárida de la India occidental, entre Delhi y Bombay. Forma parte del Physical Research Laboratory de Ahmedabad.

• El observatorio del Teide (España): se encuentra cerca de Izaña a una altitud de 2.398 m en la isla de Tenerife (Canarias) y está administrado por un consorcio público del que forma parte la Universidad de la Laguna.

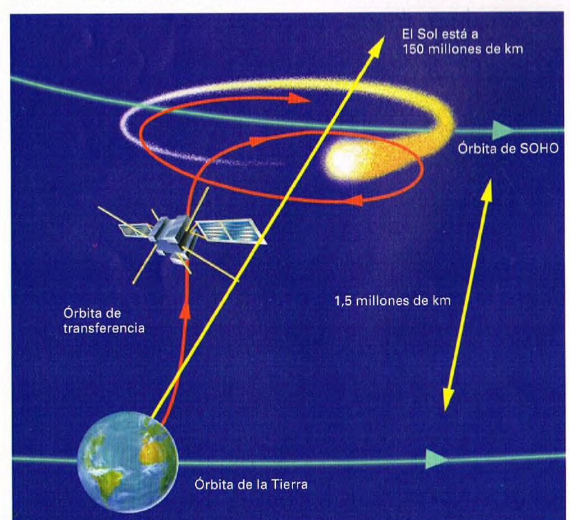
• El observatorio interamericano de Cerro Tololo (Chile): se encuentra a 2.200 m de altitud a 500 km al norte de Santiago de Chile y forma parte del National Optical Astronomy Observatory.

LOS PRIMEROS RESULTADOS ESPECTACULARES

Las fuertes emisiones procedentes de la atmósfera del Sol parecen cortos rizos de oro. Fotografiadas por el telescopio EIT, estas espículas de varios tipos dan fe de las emisiones de energía, tal vez responsables del enorme calentamiento de la atmósfera exterior de nuestro astro.

Los científicos que han analizado las primeras imágenes tomadas en 1996 han quedado impresionados por la vigorosa acción del Sol, porque estos fenómenos se han manifestado en un período que en teoría debería ser de quietud dentro del ciclo undecenal de la actividad solar.

Las imágenes obtenidas con el coronógrafo LASCO han mostrado la emisión por el Sol de miles de millones de toneladas de gas hacia los planetas del sistema solar. Este material puede llegar a influir sobre las características de la atmósfera de los planetas y por tanto también sobre la terrestre.



Abajo, el dibujo representa la transferencia y el posicionamiento de la sonda SOHO. En primer plano, la Tierra. La órbita de SOHO dista 1,5 millones de km de nuestro planeta. El Sol no es visible porque dista 150 millones de km.

DATOS

LA SONDA SOHO

Nombre: SOHO, de Solar and Heliospheric Observatory
Finalidad de la sonda: observar el Sol, desde el núcleo hasta las partes extremas de la superficie, y estudiar el viento solar
Gestión: ESA y NASA
Masa: 1.610 kg, más 240 kg de propulsante
Instrumental de a bordo: 650 kg para 12 experimentos
Longitud: 3,8 m
Lanzamiento: 2 de diciembre de 1995 con un cohete Atlas-IIAS (NASA)
Órbita: aprox. 1,5 millones de km
Centro de control: NASA Goddard
Vida prevista: entre 2 y 6 años
Energía: células solares



EN EL PRÓXIMO NÚMERO

EL SISTEMA SOLAR

MOVIMIENTOS PRINCIPALES DE LA TIERRA

ESTRELLAS Y GALAXIAS

CEFEIDAS

GUÍA DE LAS CONSTELACIONES

INDIO-GRULLA

LA EXPLORACIÓN DEL ESPACIO

LA VIDA A BORDO DE UN TRANSBORDADOR

EL USO DEL ESPACIO

LA ÓRBITA DE LOS SATÉLITES

EL UNIVERSO

ENCICLOPEDIA DE LA ASTRONOMÍA Y EL ESPACIO



19

9 788439 554219

10019

PLANETA DeAGOSTINI



COMPOSICIÓN DE LA OBRA

Volumen 1	Fascículos 1	al	16
Volumen 2	Fascículos 17	al	32
Volumen 3	Fascículos 33	al	48
Volumen 4	Fascículos 49	al	64
Volumen 5	Fascículos 65	al	80

VENTA EN QUIOSCOS

Pida a su proveedor habitual que le reserve un ejemplar de EL UNIVERSO. Adquiriéndolo todas las semanas en el mismo punto de venta facilitará la distribución y obtendrá un mejor servicio.
Las tapas correspondientes a cada volumen se ponen a la venta con el fascículo que cierra el tomo. Con dicho fascículo se entregan las portadillas correspondientes.

Presidente: José Manuel Lara
Director General: Carlos Fernández
Director Editorial: Virgilio Ortega
Director General de Producción: Félix García
Coordinador General: Carles Dorico

© Editorial Planeta Argentina S.A.I.C.
Av. Independencia, 1668 - Capital Federal
Servicio de atención al cliente: Tel. (01) 482 - 0655 y 482 - 0657
Distribuye: Capital: Huesca-Sanabria,
Baigorri, 103, Capital Federal,
Interior: D.G.P., Alvarado, 2118, Capital Federal

© Editorial Planeta Mexicana, S.A. de C.V.
Av. Insurgentes Sur # 1162 - México D.F.
Servicio de atención al cliente: Tel. 575 13 48

© Editorial Planeta Colombiana, S.A.
Carrera, 68, n.º 25-55 - Santa Fé de Bogotá, D.C.
Servicio de atención al cliente: Tel. 9800 - 15315

© Editorial Planeta Chilena, S.A.I.C.
Olivares, 1229 - Santiago de Chile

ISBN Obra completa (con vídeo): 84-395-4148-1
Obra completa (sin vídeo): 84-395-4138-4
Fascículos (con vídeo): 84-395-4149-X
Fascículos (sin vídeo): 84-395-4139-2
Depósito legal: B-47.097-1997

Impresión: Cayfosa, Santa Perpètua de Mogoda, Barcelona
Impreso en España - Printed in Spain - Mayo 1998

Los editores se reservan el derecho de modificar el precio de venta de los componentes de la colección en el transcurso de la misma, si las circunstancias así lo exigieran.
Los editores garantizan la publicación de todos los fascículos que componen esta obra.

Fotografías: Lee Gibbons: cubierta, 116-117, 116ab., 117ar.; ESA/SPL: 107c.der.; E.T. Archive: 106ar.; Galaxy Picture Library: 101, 104, tercera de cubiertas; IGDA: 107ar.der.; Science Photo Library/Julian Baum: 106-107; Dr. Jeremy Burgess: 103 der.; Range: 111; Hugh Rowland: 110; Spectrum: 110, 111; US Naval Observatory: 112ar.izq.; Bristock-IFA: 114-115; BNSC/ESA: 118ab.; ESA: 118-119, 119ab., 120c.; Tony Stone Picture Library: 120ab.
Dibujos: Robin Carter/WLAA: 104-105, 117ab.; David A. Hardy: 102-103; Hugh Rowland: 105, 106ab., 120; Katz: 108-109; Sandra Russell/Black Hat: 112ar.; Julian Baum: 113; Farroxs: 116ar.; Robin Bottel: 115ab.; Spectrum Picture Library: 114ab.

MOVIMIENTOS PRINCIPALES DE LA TIERRA

La Tierra gira sobre sí misma y alrededor del Sol. Por eso medimos el tiempo en días y años.



La Tierra, como los demás planetas del sistema solar, tiene dos movimientos principales: rotación y revolución o traslación. Estos movimientos periódicos han permitido al hombre, desde la Antigüedad, medir el paso del tiempo.

LA ROTACIÓN TERRESTRE

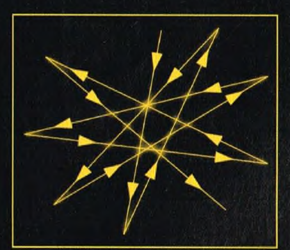
Nuestro planeta gira de oeste a este alrededor de su propio eje, es decir, la recta imaginaria que lo atraviesa y que pasa por los polos Norte y Sur. Esto significa que los polos permanecen inmóviles y no participan en el movimiento de rotación, mientras que todos los otros puntos de la superficie terrestre se mueven a una velocidad que es mayor cuanto más cercanos están al ecuador, es decir, a medida que aumenta su distancia al eje. Por ejemplo, a una latitud de 40° N, o 40° S, la Tierra se mueve a una velocidad de unos 1.200 km/h. Las consecuencias del movimiento de rotación son la alternancia del día y de la noche, y el aparente movimiento de la esfera celeste. Este movimiento diurno de los astros no puede considerarse como una prueba de la rotación de la Tierra sobre sí misma, porque podría también ser el resultado de la rotación efectiva de la esfera celeste vista desde una Tierra que se mantuviera fija e inmóvil en el espacio.

EL PÉNDULO DE FOUCAULT

La prueba irrefutable de que nuestro planeta está sujeto a una rotación alrededor de su propio eje la aportó en 1851 Foucault con su famoso experimento del péndulo. Éste efectuó el experimento en París utilizando un enorme péndulo formado por una esfera de bronce de unos 30 kg, suspendida de una cuerda de 67 m de longitud, cuyo punto de oscilación se fijó en la bóveda del Panteón.



Una sugestiva imagen aérea de una región de nuestro planeta. Se trata de Socotora (Yemen) y de dos pequeñas islas situadas frente a la costa somalí.



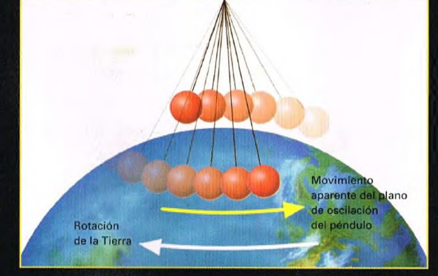
Arriba, las huellas de un péndulo, puesto en oscilación en el polo Norte, vistas desde arriba.

Imaginemos que nos hallamos en el polo Norte y que hacemos oscilar un péndulo. Éste, una vez puesto en movimiento, describirá siempre el mismo plano de oscilación, es decir, su hilo se moverá de manera oscilatoria siempre sobre el mismo plano. En efecto, la única fuerza externa que actúa sobre el péndulo es la de la gravedad, que se ejerce a lo largo de la vertical y, por tanto, no puede ser responsable de variaciones en la dirección de la oscilación. Si hacemos que el péndulo, en su movimiento oscilatorio, deje alguna huella sobre el suelo que tiene debajo, observaremos que, con el tiempo, las señales trazadas por el péndulo no se superponen perfectamente y, por tanto, no describen la misma dirección, sino que se desplazan según una lenta rotación en sentido horario. Esta rotación puede deberse a dos causas: o bien es el plano de oscilación del péndulo el que gira, o bien es el suelo. Como hay que descartar la primera hipótesis porque sobre el péndulo no actúa ninguna fuerza capaz de modificar el plano de oscilación, hay que aceptar el hecho de que es el suelo que tiene debajo el que se mueve, lo que indica que nuestro planeta está sujeto realmente a un movimiento de rotación alrededor de su propio eje. Aunque es la Tierra la que gira y no la esfera celeste, puede ser útil hablar del movimiento aparente del Sol y de los astros, porque esto es lo que ve un observador desde la superficie terrestre.

LA MEDIDA DEL TIEMPO: EL DÍA

La medida del tiempo en días se basa en el movimiento de rotación de la Tierra. Un día es el intervalo de tiempo que emplea nuestro planeta para efectuar una rotación completa en torno a su propio eje. Sin embargo, existen dos definiciones de día: si medimos la rotación de la Tierra tomando como punto de referencia el Sol en el firmamento, determinaremos el día solar. En cambio, si la referencia es una estrella, hablaremos de día sideral. La duración de ambos es diferente, ya que, mientras el día sideral dura 23 horas, 56 minutos

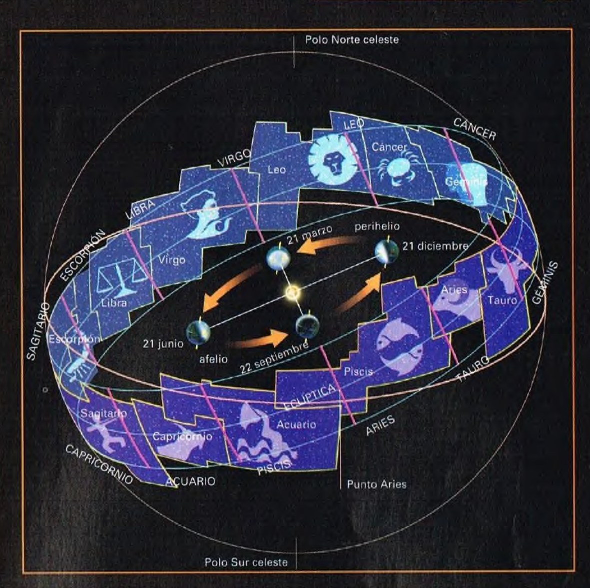
Abajo, si se hiciera oscilar un péndulo en el polo Norte, tal como se representa en la figura, se observaría que su plano de oscilación gira lentamente en el tiempo hasta que, al cabo de 24 horas, volvería a describir la dirección originaria. En realidad, es la Tierra la que se mueve y no el péndulo.





La imagen muestra la salida de la Tierra vista desde la Luna.

A la derecha, el movimiento de revolución de la Tierra alrededor del Sol hace que un observador en la Tierra vea el Sol moviéndose aparentemente, según una trayectoria llamada eclíptica, sobre el fondo de las 12 constelaciones del zodíaco. El Sol atraviesa una decimotercera constelación, la de Ofiuco que no se considera entre las zodiacales.



y 4 segundos, el día solar medio dura 24 horas. Esta diferencia viene explicada por el hecho de que la Tierra, además de girar sobre sí misma, orbita también alrededor del Sol.

En realidad, la duración del día solar es de 24 horas sólo como promedio, porque el verdadero día solar es variable. Uno de los motivos es que la Tierra, cuando está más próxima al Sol, recorre su órbita más rápidamente que cuando se halla alejada de él. Por esto, para medir el tiempo, se ha introducido la convención de usar como referencia estándar el día solar medio constante e igual a 24 horas.

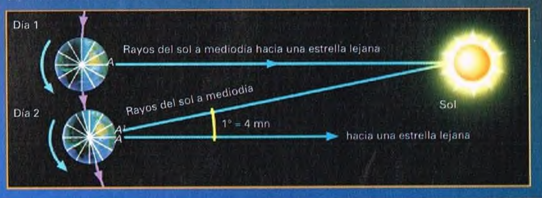
¡MOVERSE ALREDEDOR DEL SOL A 107.000 KM/H!

La revolución alrededor del Sol es el otro movimiento fundamental de nuestro planeta. La Tierra se mueve recorriendo una órbita elíptica, llamada eclíptica, porque los eclipses tienen lugar sobre su plano. La distancia media Tierra-Sol es de unos 150 millones de km y se emplea en astronomía como unidad de medida de las distancias con el nombre de unidad astronómica (u.a.). La velocidad de la Tierra en el recorrido de su órbita es de 107.000 km/h aproximadamente. El ángulo formado por el eje de rotación terrestre con el plano de la eclíptica es de 66° 33' y se mantiene constante en toda la órbita. Desde el punto de vista de un observador en la Tierra, el Sol recorre la eclíptica pasando por delante de un fondo



DIFERENCIAS ENTRE EL DÍA SIDERAL Y EL DÍA SOLAR

Consideremos en la figura dos posiciones (1 y 2) que la Tierra ocupa, con la diferencia de un día entre una y otra, al recorrer su órbita alrededor del Sol. Si A es el lugar de la Tierra en el que nos hallamos, 1 será a la posición ocupada por el planeta cuando empezamos a medir el día, ya sea respecto al Sol o respecto a una estrella de referencia. En cambio, llamaremos 2 a la posición que ocupa nuestro planeta después de efectuar una vuelta completa sobre sí mismo respecto a la estrella: la luz de la estrella, que está mucho más lejos que el Sol, nos llegará paralelamente a la dirección en que nos llegó cuando la Tierra estaba en la posición 1. Cuando estemos en el punto 2, habremos medido un día sideral, porque la Tierra habrá efectuado una vuelta completa sobre sí misma respecto a la estrella lejana, pero no lo habrá cumplido todavía respecto al Sol, que se halla mucho más cerca de la estrella y cuya dirección de observación (A¹) ha variado a consecuencia del movimiento de revolución de la Tierra. A fin de que la Tierra cumpla una vuelta completa sobre sí misma respecto al Sol (día solar), deberemos esperar a que gire aproximadamente un grado, aproximadamente unos cuatro minutos.





Arriba, se representan las posiciones recíprocas de la eclíptica y del ecuador celeste. La intersección entre ambos planos marca los puntos equinocciales de primavera y otoño.

formado por estrellas y por las constelaciones que representan el zodíaco.

LAS ESTACIONES

El movimiento de revolución y el hecho de que el eje de rotación terrestre se mantenga siempre paralelo a sí mismo a lo largo de la órbita son las causas de la alternancia de las estaciones. La Tierra, al recorrer su órbita elíptica, se encuentra en el punto más próximo al Sol (perihelio) en enero, y en el punto más alejado (afelio), en julio. En realidad, no es la variación de la distancia Tierra-Sol a lo largo de la órbita lo que provoca la alternancia de las estaciones, sino la diferente inclinación de los rayos solares respecto al suelo y la diferente iluminación de los dos hemisferios. Es verano cuando el Sol alcanza la máxima altura sobre el horizonte del lugar considerado. Esto significa que el arco que el Sol describe sobre el horizonte en su movimiento diurno es más amplio y, por tanto, la duración del día es mayor. En cambio, en invierno, los rayos solares llegan al suelo más oblicuamente y el día es más corto. El plano de la eclíptica corta el plano del ecuador celeste (proyección del ecuador terrestre sobre la esfera celeste), formando con él un ángulo de 23° 27'. La intersección de estos dos planos marca los puntos equinocciales: el equinoccio de marzo (o punto Aries), y el equinoccio de septiembre. El equinoccio de marzo corresponde a la posición que el Sol, en su movimiento aparente a lo largo de la eclíptica, ocupa el 21 de marzo, mientras que el equinoccio de septiembre se produce el 22 de septiembre. El 21 de marzo, el Sol atraviesa el ecuador celeste pasando del hemisferio sur al hemisferio norte y, por tanto, para los habitantes del hemisferio boreal (norte), empieza la primavera. El 22 de septiembre, se produce el movimiento contrario, y en el hemisferio boreal empieza el otoño. En los equinoccios, la duración del día es igual a la duración de la noche en cualquier punto de la superficie terrestre. Por otra parte, solamente en estos dos días del año el Sol ilumina simultáneamente el polo Norte y el polo Sur terrestres.

Perpendicularmente a la línea definida por los equinoccios, se encuentra la línea de los solsticios: el 21 de junio (solsticio de verano en el hemisferio norte), el Sol se encuentra 23° 27' al norte del ecuador, mientras que el 21 de diciembre (solsticio de invierno en el hemisferio norte) el Sol está a 23° 27' al sur del ecuador.

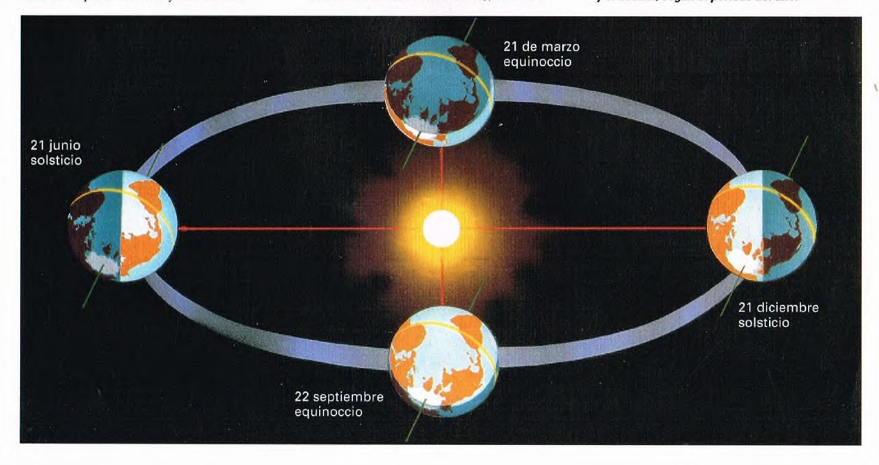
OTROS MOVIMIENTOS DE LA TIERRA

La Tierra, además de la rotación y de la revolución, tiene otros movimientos, pero éstos son más difíciles de observar. Los más importantes son el movimiento de precesión y el de nutación. Ambos se refieren al eje de rotación terrestre y se deben a la fuerza de gravedad que el Sol y la Luna ejercen sobre la Tierra. Debido a la diferente posición en que se encuentran entre sí el Sol, la Luna y la Tierra a lo largo del tiempo, el eje de rotación terrestre se ve sujeto a un movimiento que lo hace girar en el espacio a la manera de un trompo. Esto ocurre sin que varíe el ángulo de inclinación del eje terrestre sobre el plano de la eclíptica.

LA MEDIDA DEL TIEMPO: EL AÑO

El tiempo que tarda nuestro planeta en recorrer una vez su órbita se llama año y dura aproximadamente 365 días.

La alternancia de las estaciones se debe al paralelismo del eje terrestre a lo largo de la órbita, que se refleja en una iluminación diferente de los dos hemisferios, el boreal y el austral, según el período del año.

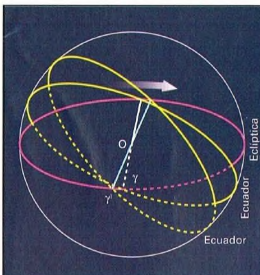


DATOS

LAS ESTACIONES PARA EL HEMISFERIO BOREAL

PERÍODO	COORDENADAS DEL SOL	SIGNO ZODIACAL	AR	DECLINACIÓN
21 marzo (empieza la primavera)	Equinoccio de primavera	Aries	0 h	0°
21 junio (empieza el verano)	Solsticio de verano	Cáncer	6 h	+23° 27′
22 septiembre (empieza el otoño)	Equinoccio de otoño	Libra	12 h	0°
21 diciembre (empieza el invierno)	Solsticio de invierno	Capricornio	18 h	−23° 27′

En el gráfico superior se puede ver que, a causa del movimiento de precesión, el eje de rotación terrestre describe una superficie cónica, aunque manteniendo siempre la misma inclinación sobre el plano de la eclíptica.



En el gráfico se representa el movimiento de precesión de los equinoccios que provoca el desplazamiento continuo del punto Aries (indicado con la letra griega gamma), causando el aumento de la ascensión recta de los astros.

DATOS

DIVERSAS VELOCIDADES DE UN PUNTO SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE SEGÚN LA LATITUD

LUGAR	VELOCIDAD DE ROTACIÓN
Polo Norte y Sur	0 (velocidad mínima)
España	1.280 km/h
Trópicos	1.530 km/h
Ecuador	1.670 km/h (velocidad máxima)

Del año, lo mismo que del día, pueden darse diferentes definiciones según el punto de referencia del firmamento que se utilice para medirlo. Para medir el año, se tiene en cuenta el tiempo que el Sol emplea, en su movimiento de revolución aparente, entre dos conjunciones consecutivas con un astro u otro punto de referencia en la esfera celeste. Se habla de conjunción cuando la Tierra, el Sol y un tercer cuerpo celeste se encuentran alineados. Entonces, si como referencia se toma una estrella, se medirá un año, llamado sideral, que tiene una duración de 365 días, 6 horas, 9 minutos y 9 segundos. En cambio, el año solar viene determinado por el tiempo que emplea el Sol para volver a estar en conjunción con el punto equinoccial de primavera. Medido de este modo, el año tiene una duración de 365 días, 5 horas, 48 minutos y 46 segundos.

La trayectoria circular que recorre el polo Norte celeste en el firmamento en el transcurso de los siglos. Actualmente, es la estrella Polar la que indica la posición del polo Norte, pero no será así en el futuro ni lo fue en un pasado lejano.

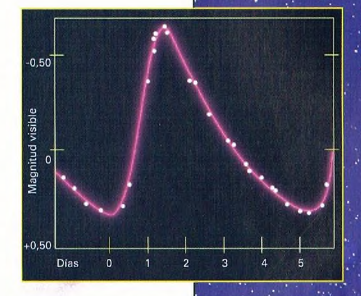


CEFEIDAS

Las cefeidas son una clase particular de estrellas cuya luminosidad varía rítmicamente con un período muy regular. Son relojes casi perfectos que, desde hace unos 80 años, ayudan a medir la escala de las distancias cósmicas.

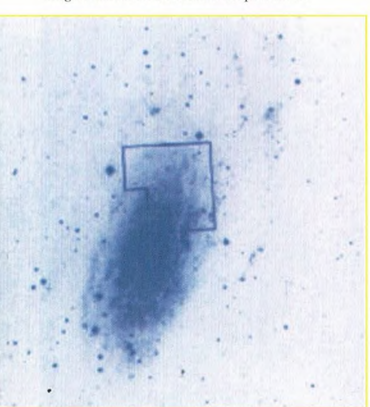


La luminosidad de una estrella nunca es rigurosamente constante, sino que a lo largo de su existencia sufre variaciones notables que están intrínsecamente ligadas a la evolución de sus características físicas. Pero, además, la estrella puede presentar variaciones de luminosidad en tiempos muy breves que, según los casos, pueden tener un carácter errático o periódico. Las variaciones de luminosidad representan también una característica tan peculiar de algunas familias de estrellas que se las cataloga en una clase aparte, la de las estrellas variables. Las más interesantes son las llamadas variables pulsantes, que muestran modulaciones periódicas de luminosidad. Entre ellas, hay que mencionar particularmente las variables cefeidas, así llamadas por el nombre del prototipo de esta clase: la estrella δ *Cephei*, la cuarta en orden de brillo de la constelación circumpolar de Cefeo. Las cefeidas presentan modulaciones periódicas de luminosidad extremadamente regulares y, de las variables pulsantes, son las que presentan menores irregularidades en la duración del período de



Arriba, curva de luz de* δ Cephei. *En las cefeidas, las fluctuaciones de luz se deben a variaciones periódicas del estado físico de la estrella que se manifiestan como pulsaciones del globo gaseoso.

A la derecha, una fotografía elaborada por ordenador. Encuadra el gran campo estelar que comprende algunas galaxias del cúmulo de Virgo, en las cuales el telescopio Hubble ha observado algunas cefeidas.



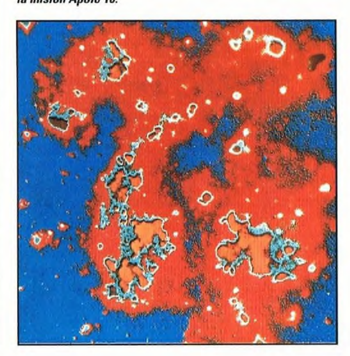
A la izquierda, la galaxia NGC 3621, que forma parte del cúmulo del Horno, y cuya distancia se ha determinado utilizando las cefeidas.

RELOJES DEL COSMOS

El estudio de las cefeidas, estrellas variables de pulsación regular, tiene un gran interés astrofísico, ya que permite calcular con exactitud suficiente distancias cósmicas que de otro modo no serían medibles.

pulsación. Actualmente, se han observado más de 400 cefeidas en nuestra galaxia, y otras 1.000 se han identificado en las Nubes de Magallanes, las dos galaxias satélites de la nuestra. Además, se ha observado un número significativo de cefeidas en otras galaxias próximas. Las modulaciones de luminosidad que presenta una cefeida durante todo el ciclo, determinadas por la amplitud de su curva de luz, suelen estar comprendidas entre un mínimo de 0,35 y un máximo de 1,5 magnitudes, lo que corresponde a un incremento de cuatro veces el flujo de la estrella. Una de las características principales que permite distinguir las cefeidas de otras estrellas variables es que la amplitud de la curva de luz varía según la banda del espectro visual en la que se observa. En especial, las modulaciones aparecen más acusadas en longitudes de onda inferiores, típicamente en el azul y en el ultravioleta más que en el rojo. Por lo que respecta a los períodos de las cefeidas, están comprendidos entre 0,2 y 100 días, aunque los valores están distribuidos de diferente manera en nuestra Galaxia que en las Nubes de Magallanes. En la mayoría de los casos, las curvas de luz de las cefeidas se caracterizan por un perfil más bien asimétrico, con un rápido ascenso hacia la luminosidad máxima y un descenso más lento hacia la mínima. A pesar de que las curvas de luz se reproducen de manera constante en una misma estrella, pueden ser muy distintas de una estrella a otra. Especialmente, la comparación entre las curvas de luz de diversas variables cefeidas parece haber demostrado la existencia de una correlación sistemática entre la amplitud misma de la curva de luz

Abajo, imagen de la Gran Nube de Magallanes en una imagen de la NASA, tomada en el ultravioleta, durante la misión Apolo 16.







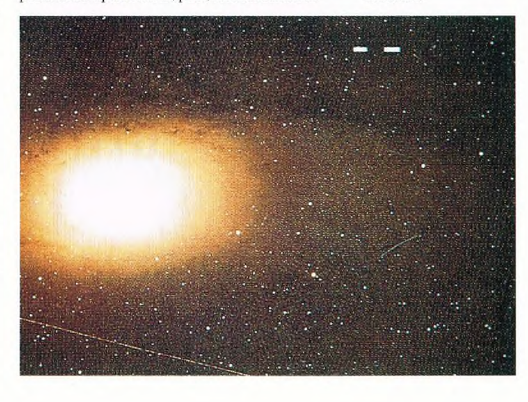
A la izquierda, en las dos imágenes pueden verse dos variables cefeidas de la galaxia de Andrómeda. Comparando ambas fotografías, tomadas con tiempos de exposición diferentes, se observan con claridad las variaciones de luminosidad. Las estrellas cefeidas están marcadas con pares de trazos.

y el valor del período de pulsación. Por otra parte, las cefeidas con un período más largo son también las que, genéricamente, muestran variaciones de magnitud más sensibles. Algunas cefeidas de período corto tienen curvas de luz de forma sinusoidal, con amplitudes de sólo 0,5 de magnitud. Estas estrellas no son muy corrientes en nuestra galaxia, pero representan alrededor del 10% de la población de las cefeidas en las Nubes de Magallanes.

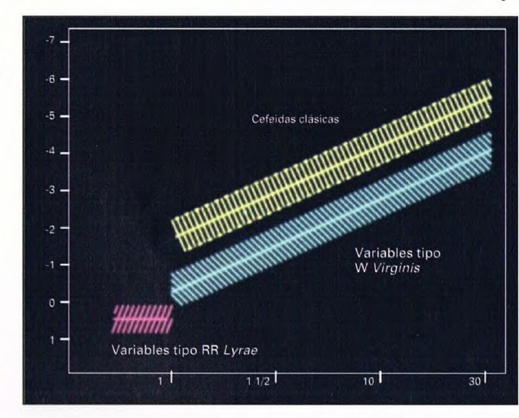
LOS MECANISMOS DE PULSACIÓN

En términos generales, conocemos los procesos físicos que provocan las variaciones de las cefeidas. La luminosidad *L* de una estrella depende, en realidad, de su temperatura superficial *T* y de las dimensiones de la superficie emisora, según la relación: $L = 4\pi R^2 sT^4$, donde *R* es el radio de la estrella y *s* una constante llamada de Stefan-Boltzmann. En esta relación, el radio de la estrella está al cuadrado, mientras que la temperatura se eleva a la cuarta potencia. Por este motivo, las variaciones de esta última son precisamente lo que más influencia tiene en la luminosidad de la estrella. Por tanto, eventuales variaciones periódicas de la temperatura de la estrella pueden reproducir las modulaciones de luminosidad observadas. En el caso de las cefeidas, las variaciones de temperatura pueden tener lugar a consecuencia de una serie de contracciones y expansiones radiales de la propia estrella en torno a un valor medio del radio. El período de pulsación de una cefeida sería proporcional al valor medio del radio que, a su vez, depende intrínsecamente de las características de la propia estrella. Según este modelo, la contracción de la estrella produce un aumento de temperatura en las regiones centrales y, por consiguiente, del número de reacciones nucleares, lo cual, a su vez, provoca un aumento global de la luminosidad. Luego, el aumento de energía liberada tiende a detener la contracción de la estrella y a producir una dilatación de las capas más externas. Después de la expansión, la estrella se enfría, con la consiguiente disminución de su luminosidad. Alcanzada cierta temperatura mínima, la expansión se detiene y el radio de la estrella se ajusta en torno a una posición de equilibrio. Así, pues, la luminosidad de

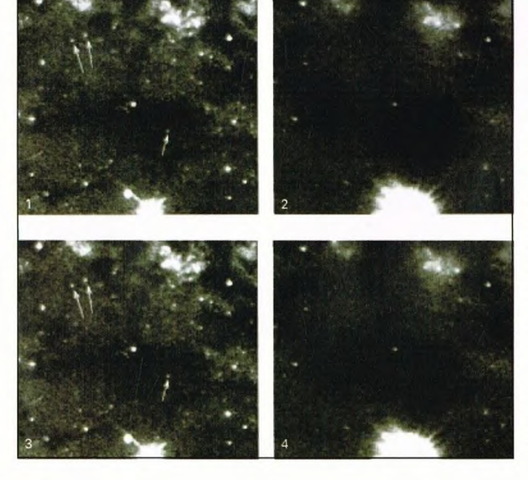
Abajo, en 1924 se identificó la primera variable cefeida en la galaxia M31. En la imagen se encuentra arriba a la derecha, entre los dos trazos.



una variable cefeida es inversamente proporcional a sus dimensiones, lo que significa que es máxima cuando el radio *R* es mínimo, y viceversa. En realidad, existe un desfase –igual aproximadamente a un cuarto de período– entre los dos ciclos. En un tiempo breve, la cefeida vuelve a contraerse e inicia un nuevo ciclo. Sin embargo, este mecanismo no continúa indefinidamente, sino que está destinado a amortiguarse después de algunos miles de años a causa del rozamiento que se produce en el interior de la estrella. La variación del período de pulsación de una cefeida a intervalos largos de tiempo ha sido estudiada con detalle, precisamente en el prototipo de esta clase, la estrella δ *Cephei*, que está siendo observada desde hace unos doscientos años. Su período de pulsación (5,3 días) parece disminuir de manera regular a un ritmo de 0,089 segundos cada siglo. Según el diagrama de Hertzsprung-Russell, variaciones de temperatura implican variaciones de la clase espectral de la estrella. Por este motivo, una cefeida no tiene una clase espectral bien definida, sino que depende de manera crítica de la fase de su ciclo de pulsación. Por ejemplo, en su brillo mínimo, una cefeida puede aparecer como una estrella de tipo G o K, mientras que en su brillo máximo aparecerá como una A o F. Dadas las dimensiones típicas de estas estrellas, de 10 a 150 radios solares, una variación del radio igual a, aproximadamente, el 10% implicaría velocidades radiales de expansión y contracción del orden de 30-60 km/s. Estas velocidades se han medido efectivamente en algunas cefeidas observando la variación de longitud de onda de las rayas de emisión del espectro debidas al efecto Doppler. Tal como se espera del modelo, la evolución de la curva de luz de la estrella sigue de manera perfectamente especular la distribución de la velocidad radial de una cefeida en función del período de pulsación. En especial, el mínimo de la curva de velocidad radial, que corresponde a la fase de expansión de la estrella, tiene lugar simultáneamente con un máximo de la curva de luz. El hecho de que en las cefeidas se produzcan oscilaciones radiales indica que estas estrellas se encuentran en condiciones inestables y que, por tanto, están atravesando fases especiales de su evolución. Una estrella deja la secuencia principal del diagrama de Hertzsprung-Russell después de que las reacciones nucleares hayan provocado el agotamiento del hidrógeno en el interior del núcleo y la formación de un nucléolo de helio temporalmente inerte. Si la masa de la estrella es superior a 2-3 masas solares, la fusión del hidrógeno continúa produciéndose en las capas más externas y la estrella se expande hasta convertirse en una gigante roja. Mientras, idealmente, la estrella se mueve hacia la zona de las gigantes rojas y atraviesa una región del diagrama H-R conocida como banda de inestabilidad. En esta fase evolutiva concreta, se dan en el interior estelar las condiciones de inestabilidad que disparan oscilaciones radiales, y la estrella entra en la fase de cefeida. En este punto, si la masa de la estrella es superior a cinco masas solares, se inicia la fusión del helio en su núcleo. La temperatura aumenta y la estrella se desplaza de la región de las gigantes rojas, atraviesa por segunda vez la banda de inestabilidad y vuelve al estado de cefeida. Según su masa, una estrella puede pasar varias veces por este estado. Mientras que el primer paso a través de la banda de inestabilidad ocurre de una manera más bien rápida en todas las estrellas, independientemente de su masa, en cambio, un eventual segundo paso es



Arriba, gráfico de la magnitud absoluta en función del período de variabilidad de las cefeidas. Las W* Virginis *tienen menos masa y son más viejas, mientras que las RR* Lyrae *se encuentran en los cúmulos globulares y son excelentes indicadores de distancia.



A la izquierda, cuatro imágenes de una región de M100: 1) toma del telescopio espacial Hubble, las flechas indican cefeidas; 2) toma también del Hubble antes de la corrección de su sistema óptico; 3) elaborada por ordenador; 4) toma de un telescopio en tierra.

muy lento. Por este motivo, la mayor parte de las cefeidas que observamos deben hallarse en esta fase evolutiva. El módulo de distancia *MD* se define como la diferencia entre la magnitud aparente de una estrella *m* y su magnitud absoluta *M*. Según la ley de Pogson, esta diferencia depende de la distancia *d* de la estrella, según la relación: $m - M = 5\log_{10}(d) - 5$.

Pero la magnitud aparente de una estrella no depende solamente de su distancia. En efecto, parte del flujo emitido es absorbido durante el paso a través del medio interestelar, y la estrella se nos muestra más débil de lo que es en realidad. Por este motivo, la magnitud aparente *m* en la relación que figura más arriba se corrige introduciendo un término adicional *A* que representa la variación de magnitud de la estrella debida a la absorción interestelar. Es decir:
$(m - A) - M = 5\log_{10}(d) - 5$.

Naturalmente, el valor del módulo de distancia así calculado es más correcto cuanto más precisa es la estimación de la absorción interestelar. Por tanto, según esta relación, y una vez conocido su módulo de distancia, es posible saber la distancia *d* de una estrella. Como la magnitud aparente *m* viene determinada por las observaciones, el problema principal consiste en identificar con precisión la magnitud absoluta *M* de la estrella.

CEFEIDAS COMO INDICADORES DE DISTANCIA

Existe una relación, llamada ley período-luminosidad, que vincula directamente la magnitud absoluta *M* de una estrella cefeida, calculada en el máximo de la curva de luz, con el valor de su período de pulsación *P*. En general, esta relación viene expresada por una función del tipo: $M = A + B\log_{10}(P)$, donde *P* está expresado en días, y *A* y *B* son dos constantes a determinar que varían ligeramente según los casos considerados. El aumento de la luminosidad de las cefeidas en función del período, tomado de la relación período-luminosidad, es compatible con la teoría de la pulsación estelar según la cual la luminosidad depende del radio y, a su vez, este último es proporcional al período. La consecuencia más importante de la relación período-luminosidad es que proporciona un método razonablemente seguro para evaluar la magnitud absoluta de una cefeida. Una vez conocida ésta, es posible conocer la distancia calculando,

PERSONAJES

HENRIETTA LEAVITT



1868 - 1921

La relación período-luminosidad fue deducida en 1912 por Henrietta Leavitt, entonces una investigadora del observatorio de la Universidad de Harvard. En aquella época, Henrietta Leavitt había desarrollado una nueva técnica para medir la magnitud aparente de una estrella partiendo de su imagen en la placa fotográfica. De este modo, no sólo era posible percibir la variación de una estrella, sino también medir la entidad de la variación. Leavitt utilizó esta nueva técnica para medir la variabilidad de un grupo de estrellas de la Pequeña Nube de Magallanes. Durante estos trabajos, tuvo la intuición de comparar los valores de las magnitudes aparentes de algunas variables cefeidas con sus períodos de pulsación y se percató de que las estrellas más luminosas eran las que tenían un período más largo. Observó, especialmente, que en un diagrama ideal de *m* en función de $\log_{10}(P)$ los puntos se disponían a lo largo de una recta. Dado que todas las estrellas pertenecían a la misma galaxia, su distancia era aproximadamente igual (50 kiloparsec) y, por tanto, la relación hallada por Henrietta Leavitt también podía aplicarse directamente a las magnitudes absolutas.



A la derecha, Edwin Hubble, el célebre astrónomo que ha dado nombre al telescopio espacial, mientras utilizaba el telescopio de 254 cm de monte Wilson. Observó que una parte de la nebulosa de Andrómeda estaba compuesta por algunas cefeidas.

LA DISTANCIA A M100

Recientemente, y gracias al empleo de la ley período-luminosidad de las variables cefeidas, ha sido posible calcular la distancia a la galaxia espiral M100. Esta galaxia, que ocupa el lugar 100 en el catálogo de Messier, se encuentra en el interior de un cúmulo de unas 2.500 galaxias, en dirección a la constelación de Virgo (cúmulo de Virgo). El valor obtenido es de 56 millones de años luz, con una aproximación de 5. La galaxia M100 es la más alejada cuya distancia ha sido posible calcular con el método de las cefeidas. Las observaciones que han conducido a este descubrimiento proceden del telescopio espacial Hubble, el único que tiene la posibilidad de observar cefeidas en una galaxia tan distante. Esta medida proporciona, también, la distancia al cúmulo de Virgo y, por tanto, tiene una importancia fundamental para la astronomía extragaláctica y la cosmología. En efecto, conocer la distancia a cúmulos de galaxias permite hacer una estimación de las dimensiones del universo a gran escala y, además de dar su edad, facilita el cálculo de su velocidad de expansión en cierta dirección y en función de la distancia. Este parámetro es la famosa constante de Hubble. Según estos resultados, el universo se estaría expandiendo en dirección al cúmulo de Virgo a un ritmo de 80 km/s por megaparsec. Esta medida implicaría una edad del universo que variaría entre 8 y 12.000 millones de años, un valor, sin embargo, que suscita cierta perplejidad, ya que es inferior a la edad estimada para algunas estrellas más viejas.



simplemente, la diferencia respecto a la magnitud aparente (módulo de distancia). Por este motivo, las cefeidas tienen también el importante papel de indicadoras de distancia. Como tales, su importancia en astronomía para la medida de las distancias extragalácticas es enorme. Por ejemplo, identificar una cefeida en una galaxia distante y medir su período de pulsación permite conocer inmediatamente su distancia y, con ella, la de la galaxia misma.

CLASIFICACIÓN DE LAS CEFEIDAS

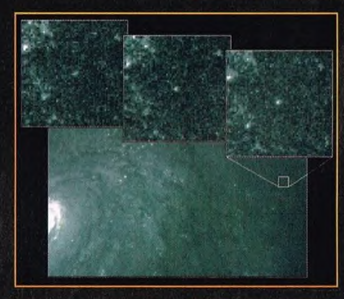
Las cefeidas pueden dividirse en dos subclases. A la primera pertenecen las llamadas cefeidas clásicas. Son estrellas de población I, es decir, estrellas muy jóvenes, con una edad de 100 millones de años aproximadamente, localizadas con preferencia en los brazos espirales de nuestra Galaxia. Las cefeidas clásicas son supergigantes, con una masa equivalente a muchas masas solares y, típicamente, son de 500 a 30.000 veces más brillantes que el Sol, a pesar de que su temperatura superficial es poco más elevada (T: 10.000 grados). Su tamaño, en efecto, es considerablement mayor, por lo que según la ley $L = 4\pi R^2 sT^4$ la mayor superficie radiante determina también su mayor luminosidad.

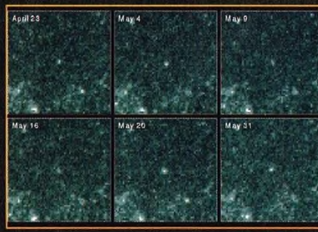
La segunda clase es la de las cefeidas de tipo W *Virginis*, así llamadas por el nombre de la estrella prototipo. Se trata de estrellas más viejas y que, por tanto, pertenecen a la población II. A diferencia de las cefeidas clásicas, se encuentran en el núcleo y en el halo de nuestra galaxia, especialmente en el interior de los cúmulos globulares. Las W *Virginis* tienen también períodos de pulsación más breves respecto a las cefeidas clásicas, generalmente inferiores a 18 días, e, intrínsecamente, son menos luminosas: aproximadamente un par de magnitudes menos. En estas dos clases de cefeidas, los diagramas período-luminosidad son generalmente similares y están representados por dos rectas casi paralelas.

A la izquierda, en la constelación de Virgo hay muchísimas galaxias. La más bella es M104, llamada Sombrero por su forma tan característica.



Arriba, galaxia espiral en el cúmulo de Virgo, tomada por la Planetary Camera del telescopio espacial Hubble.





Arriba y a la derecha, diversas imágenes de una cefeida en la galaxia M100. Las fotografías, tomadas por el telescopio espacial Hubble con el intervalo de algunos días, muestran las variaciones de luminosidad de la estrella y han servido para determinar la distancia a la galaxia.

INDIO – GRULLA

El Indio y la Grulla son dos constelaciones del hemisferio austral. Como muchas otras de esta parte de la bóveda celeste, han sido catalogadas en tiempos relativamente recientes.



El Indio y la Grulla son dos constelaciones poco llamativas. Ambas aparecieron por primera vez en el atlas estelar de Bayer, en 1603. Aparte de dos estrellas de la constelación de la Grulla, no contienen astros muy luminosos.

DÓNDE BUSCARLAS

Además de estar formadas por estrellas débiles, estas dos constelaciones son relativamente difíciles de situar, dada la escasez de alineamientos. Probablemente, el mejor modo de proceder sería tomar como referencia el Cuadrado de Pegaso y prolongar unos 60° hacia el sur el lado occidental, es decir, el que está a la derecha de quien tiene el norte a la espalda. De este modo, se llega cerca de Beta *Gruis*, una de las dos estrellas brillantes de esta última constelación.

ESTRELLAS NOTABLES

Beta *Gruis* (magnitud 2,1) no presenta atractivos especiales: es una estrella roja cuya temperatura superficial es aproximadamente 3.500 °C. En cambio, Alfa *Gruis*, o Alnair, la luminosa (magnitud 1,7), es muy caliente y se halla a 78 años luz, menos de un tercio de la distancia de Beta hasta nosotros. El par de estrellas formado por Delta 1 (magnitud 4) y Delta 2 (magnitud 4,1), está formado por dos estrellas que nos parecen próximas sólo por un efecto de perspectiva. Estos dos astros parecen estar separados entre sí hasta el punto de no estar ligados por la recíproca atracción gravitatoria. Por otra parte, todavía no se ha conseguido medir la distancia a Delta 2, lo que hace que el misterio continúe. La medida de las distancias es el método más seguro para establecer si dos cuerpos celestes están ligados o no por la fuerza de la gravedad, pero de todas las medidas que pueden hacerse en astronomía, la de la distancia es la más difícil porque la que nos separa de los objetos que observamos es enorme. Esto hace difícil la aplicación de métodos directos, como la triangulación.

Seguramente fruto de un alineamiento sólo de perspectiva, sin ligazón física ninguna, es el par formado por Mu 1 y Mu 2. La primera (magnitud 4,8) es una estrella que se halla a 260 años luz de nosotros, mientras que la segunda (magnitud 5,1) está 40 años luz más alejada.



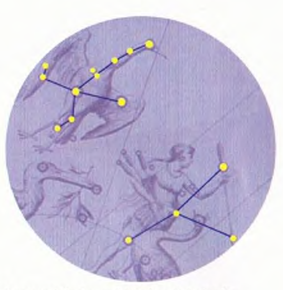
Arriba, campo estelar que comprende la constelación de la Grulla y regiones limítrofes del firmamento.



LOS MITOS Y LAS ESTRELLAS

LAS CONSTELACIONES DEL HEMISFERIO AUSTRAL

Las constelaciones del Indio y de la Grulla fueron introducidas por Bayer en su atlas de 1603. Recuerdan, respectivamente, a las poblaciones indias de América y a la elegante ave de patas largas. En realidad, la Grulla había aparecido ya en un planisferio de Plancius de 1598, quien atribuyó, en una representación más tardía del cielo, el nombre de Flamenco. Como todas las constelaciones descubiertas en tiempos recientes, estas dos agrupaciones de estrellas no se han relacionado con ninguna leyenda, a pesar de que la grulla era el ave consagrada a Mercurio, el dios de los pies alados.



Las constelaciones del Indio y de la Grulla contribuyen a poblar el cielo austral, llenando una región del firmamento relativamente pobre en objetos luminosos.

En la constelación del Indio, recordemos dos sistemas dobles: Delta, formado por dos estrellas, las dos de magnitud 5,3, y Theta, cuyos componentes tienen, respectivamente, magnitudes 4,5 y 7. La estrella Épsilon (magnitud 4,7) es una de las más próximas a la Tierra, y se halla solamente a 11 años luz del sistema solar.

OBJETOS EN LAS CONSTELACIONES

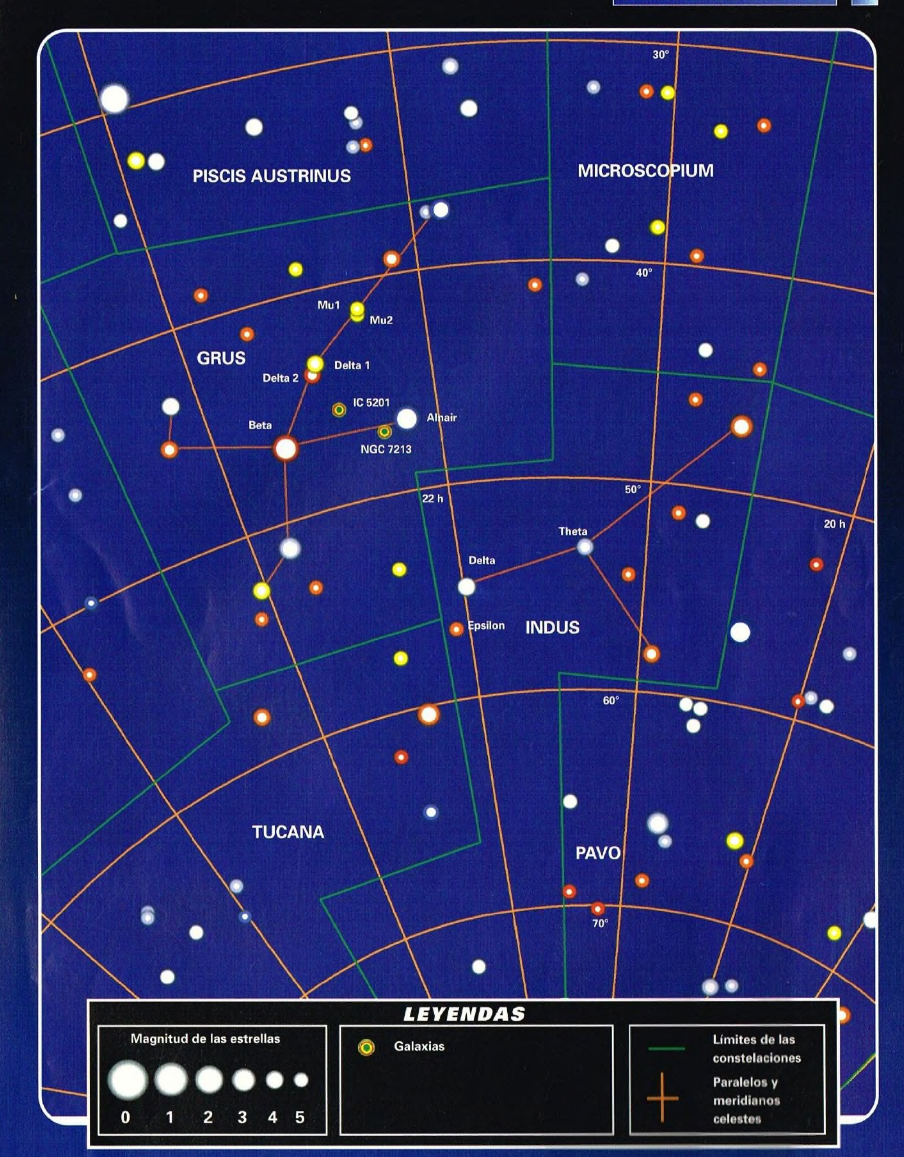
El Indio no contiene objetos de interés especial. Pero, en los límites de la Grulla hay un grupo pequeño de galaxias, entre ellas la NGC 7213, una pequeña galaxia espiral visible casi de frente. La IC 5201 (magnitud 11), aun siendo más extensa que NGC 7213 (magnitud 10), es menos luminosa.

DÓNDE BUSCARLA

EL INDIO Y LA GRULLA

La constelación del Indio abarca una región del cielo comprendida entre 45° S y 75° S de declinación, y entre 20 horas 25 minutos y 23 horas 25 minutos de ascensión recta. Es íntegramente visible todo el año desde latitudes situadas más al sur que 45° S y parte del año desde las regiones comprendidas entre 45° S y 15° N.

La constelación de la Grulla corresponde a la región de la bóveda celeste comprendida entre 37° S y 56° S de declinación, y entre 21 horas 25 minutos y 23 horas 25 minutos de ascensión recta. Es íntegramente visible todo el año desde latitudes más al sur que 63° S y parte del año desde las regiones comprendidas entre 63° S y 34° N.



PISCIS AUSTRINUS
MICROSCOPIUM
GRUS
Mu1
Mu2
Delta 1
Delta 2
IC 5201
Beta
Alnair
NGC 7213
30°
40°
50°
60°
70°
22 h
20 h
Theta
Delta
Epsilon
INDUS
TUCANA
PAVO
LEYENDAS
Magnitud de las estrellas
0 1 2 3 4 5
Galaxias
Límites de las constelaciones
Paralelos y meridianos celestes

LA VIDA A BORDO DE UN TRANSBORDADOR

La vida a bordo de una cápsula o de una estación espacial ha mejorado mucho respecto a las primeras misiones de los años sesenta. Sin embargo, para un vuelo espacial todavía hace falta poseer un gran espíritu de adaptación.





La vida en el espacio se desenvuelve en un ambiente muy inhóspito, por ejemplo, con temperaturas que pueden variar de +120 °C a –100 °C, o con rayos cósmicos muy peligrosos para el organismo humano. Y no sólo esto. También la falta de gravedad crea grandes trastornos, sobre todo durante los primeros días de vuelo. Otro peligro es el de los micrometeoritos, que pueden golpear y perforar una estación espacial. El ser humano ha de aprender a vivir en un mundo en el que es imposible hallar alimento, agua y las comodidades a que estamos acostumbrados en la Tierra. De todo esto, sin embargo, no puede prescindirse, especialmente cuando los astronautas afrontan viajes tan largos.

¿QUÉ HAY A BORDO DE UN TRANSBORDADOR?

En estos últimos años, diversas agencias espaciales están trabajando para construir microhábitats que permitan, en el interior de las astronaves, el crecimiento de plantas comestibles, de manera que el alimento y el oxígeno puedan obtenerse directamente del espacio sin tener que llevarlo todo desde la Tierra. Sin embargo, por el momento, la estación espacial rusa MIR y los transbordadores estadounidenses o, en el futuro, la estación espacial internacional Alpha, deben y deberán recibir de la Tierra todo lo que permita la supervivencia de los astronautas. Por este motivo, se procura que el soporte logístico para la vida diaria se reduzca al mínimo indispensable.

Veamos ahora qué puede encontrar en un transbordador un astronauta que parte para un viaje al espacio de 8-15 días.

A la derecha, los astronautas Gordon Cooper y Walter Schirra, de la misión Mercury Atlas 8, lanzada con éxito el 3 de octubre de 1962.

CÓMO SE COME Y SE BEBE

Los alimentos que hay en la cápsula espacial han sido pensados para que sean, a la vez, alimenticios y apetecibles.

No obstante, antes de hablar de ellos hay que recordar, aunque sea muy brevemente, qué han comido los astronautas en las cápsulas durante las misiones que precedieron al transbordador en los años sesenta, setenta y ochenta.

Durante los primeros vuelos espaciales, los alimentos permitidos eran sólo los que podían conservarse en tubos como los de dentífricos, o bien comprimidos en tabletas. Obviamente, ante estos alimentos y comidas, los astronautas no podían entusiasmarse mucho.

Con el programa Gemini, se introdujeron alimentos deshidratados y congelados que podían rehidratarse directamente en el espacio. Pero todavía se estaba muy lejos de una comida que tuviera la consistencia de la que estamos habituados a consumir en la Tierra.

Abajo, interior de la estación espacial MIR. El astronauta que se ve flotando al fondo es Charles J. Precourt.





Arriba, el astronauta Bean (a la izquierda de la fotografía) está afeitándose mientras le contempla su compañero Conrad. El interior es el panel de control del Apolo 12.

Finalmente, en las astronaves Apolo, las que llevaron el hombre a la Luna, se disponía de alimentos en cajas y también de pan tierno. Otra innovación introducida durante estos vuelos fueron algunos contenedores dentro de los cuales se introducía agua por medio de una válvula que rehidrataba los alimentos y éstos podían comerse con una cuchara. En otras palabras, el problema de los alimentos para los astronautas era una cuestión de consistencia física, lo que se buscaba era dar al astronauta la sensación de que consumía alimentos lo más parecidos a los alimentos terrestres.

En el Skylab, la primera estación espacial estadounidense, se llegó incluso a poner a disposición de los astronautas un congelador dentro del cual se apilaron filetes, langostas y hasta helados. También había alimentos elegidos individualmente por los astronautas, alimentos que se conservaban en latas similares a las utilizadas para las bebidas. Los astronautas del Skylab disponían también de un tablero en el cual podían apoyar bandejas con ocho cavidades. En ellas se insertaban las latas de alimentos. Tres de estas cavidades tenían un sistema que podía calentar los alimentos hasta 66 °C. La superficie de las bandejas estaba magnetizada, de manera que en ellas se podían depositar los cuchillos, cucharas, tenedores, tenacillas y todo lo necesario para tomar una comida sin que los utensilios se pusieran a flotar por la cápsula como consecuencia de la ingravidez.

En el transbordador, la situación ha cambiado. En efecto, ahora hay una especie de despensa con un dispensador de agua caliente y fría, bandejas, una alacena y un horno para calentar los alimentos. Pero, a diferencia de lo que ocurría en el Skylab, a bordo del transbordador no hay congelador.

Todavía hoy, sin embargo, la mayor parte de los alimentos está deshidratada, aunque algunos de ellos, los que tienen una larga duración, están termoestabilizados. Esto quiere decir que, en tierra, han sido escaldados hasta el punto justo de eliminación de las bacterias, impidiendo así que enmohezcan.

En cambio, el pan y unos pocos alimentos más son sometidos a radiaciones que matan las bacterias y permiten una larga conservación. Es un sistema que también se aplica en muchos países a ciertos productos de consumo habitual. Finalmente, algunos alimentos, como nueces y bombones, pueden llevarse a bordo en sus condiciones naturales.

Hay un menú fijo para seis días, pero si en el momento de la preparación de las comidas se desea alguna cosa diferente de lo preestablecido, es posible sustituir una ración alimenticia por otra que se encuentre en la despensa.

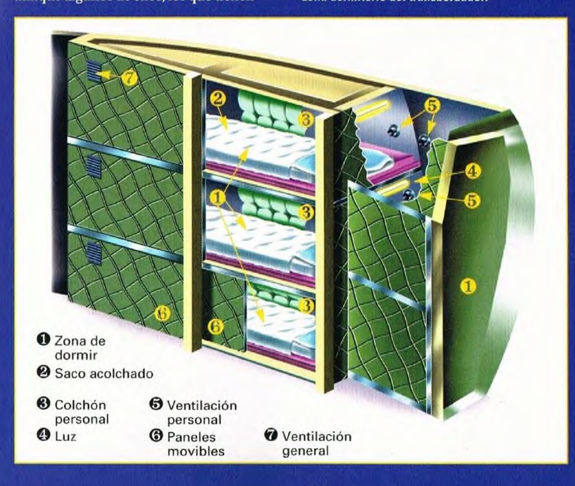
La dieta se calcula de manera que cada astronauta consuma unas 3.000 calorías diarias.

Se tarda aproximadamente 20 minutos en la preparación de una comida destinada a una tripulación de siete personas.

En realidad, todo lo que hay que hacer es añadir agua a los alimentos deshidratados, ponerlos en el horno, cortar los envases de plástico, preparar las bebidas y ponerlo todo en la bandeja contenedora.

Se puede comer de pie, utilizar el tablero de trabajo o apoyar directamente la bandeja en el techo del transbordador.

Abajo, este dibujo esquemático representa la zona dormitorio del transbordador.



CÓMO SE DUERME

La disposición del dormitorio varía según la estación espacial y la misión. Por ejemplo, si la expedición se compone de siete personas, los astronautas han de dormir como si estuvieran en un dormitorio.

Una posible configuración prevé cuatro literas, tres de ellas horizontales y una vertical respecto a la base del transbordador. Cada litera tiene una longitud aproximada de 1,75 m y una anchura de 75 cm. Todas están provistas de un saco, no muy distinto del que se utilizaba en las misiones Apolo, fijado sobre una tabla acolchada. En ausencia de gravedad, el uso del saco produce en el astronauta la impresión de hallarse sobre un cómodo colchón porque mantiene el cuerpo hacia abajo.

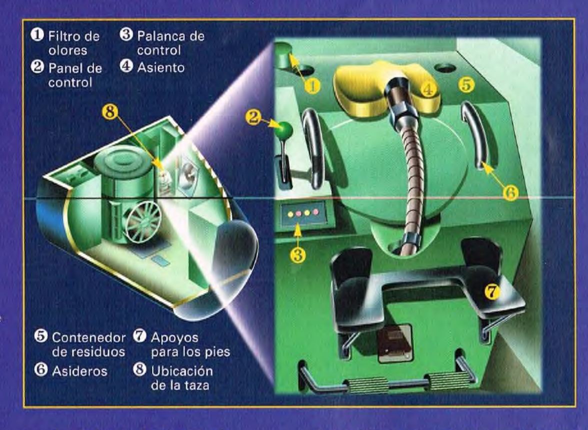
Otras veces, los astronautas prefieren dormir libres dentro de la zona destinada a dormitorio, fijando simplemente el saco a un tabique y sin retirarse a la litera.

Generalmente, los astronautas disponen de 45 minutos para prepararse la cama, 8 horas para dormir y por la mañana 45 minutos para su propia higiene personal. Normalmente, la tripulación guarda turnos de descanso, pero a veces todos pueden dormir a la vez. Sin embargo, en este caso, al menos un astronauta permanece en vela para mantener la comunicación con la base de Tierra e intervenir en caso de necesidad.

HIGIENE PERSONAL

Es extremadamente importante que todo el personal de la tripulación se mantenga limpio durante los días del vuelo. Por esto, el recinto de servicios higiénicos debe funcionar perfectamente. El servicio del transbordador puede ser utilizado indiferentemente por hombres y mujeres. Evidentemente, a causa de la falta de gravedad hay mucha diferencia entre un recinto de servicios espacial y uno terrestre.

A bordo del transbordador, se accede al baño por medio de una puerta normal. A la derecha de la taza hay una palanca y un panel con los mandos. Cuando la palanca está en posición *forward*, se abren las válvulas de los orificios de salida, el aire es aspirado y un conjunto de orificios empieza a girar. Esto desmenuza el material sólido y lo deposita en un hueco expresamente dispuesto. Cuando la palanca se coloca en posición *off*, las válvulas se cierran y los residuos sólidos quedan expuestos al vacío del espacio, de manera que se desecan. El servicio puede utilizarse cuatro veces cada hora. El mecanismo de los servicios higiénicos constituyó un serio problema para los astronautas en muchos viajes espaciales, ya que no siempre funcionaron de manera correcta. Solamente después de decenas de vuelos se consiguió resolver, y se espera que para siempre, los problemas más graves.



Arriba, el dibujo esquemático representa la zona donde está localizado el lavabo en el interior del transbordador.



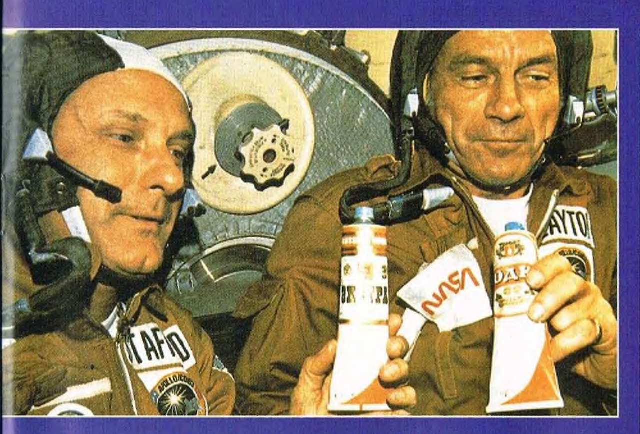
Abajo, interior del transbordador espacial. El astronauta John W. Young, comandante de la misión STS-1, hace su aseo matutino.

Para la higiene personal, los astronautas tienen a su disposición un *kit* individual que incluye dentífrico y cepillo de dientes, peine, jabón, champú, cepillo, desodorante, lápiz graso contra las grietas de los labios, loción para la piel y otros productos más o menos importantes. Para los hombres, también se incluye crema y maquinilla de afeitar.

Para lavarse, hay un lavabo, pero no ducha. El aseo corporal hay que hacerlo con las toallas de que dispone cada astronauta. En cambio, en la estación espacial MIR hay una ducha, pero la tripulación puede permanecer en la MIR durante meses...

CÓMO SE VISTEN LOS ASTRONAUTAS DEL TRANSBORDADOR

Los vestidos que se utilizan en el transbordador se diseñan teniendo





Arriba, el astronauta Robert L. Cripper, piloto del STS-1, a bordo del transbordador Columbia, en órbita terrestre.

en cuenta que han de ser confortables y, al mismo tiempo, funcionales. Cuando no han de trabajar en el exterior de la cápsula, los astronautas disponen de un elegante traje completo formado por chaqueta y pantalón azul cobalto de algodón suave. Estos trajes se confeccionan de manera que los astronautas puedan ponérselos sin los problemas que podría causar la falta de gravedad. Tienen muchos bolsillos que se cierran con cremalleras o con velcro y que sirven para guardar pequeños objetos.

Además del mono de trabajo, los astronautas disponen también de una camiseta de color azul. Evidentemente, también tienen la cantidad apropiada de ropa interior: mudas, calcetines, etc. Todas las prendas de vestir han sido sometidas a un tratamiento ignífugo.

LA COMUNICACIÓN EN EL INTERIOR DEL TRANSBORDADOR

Uno de los elementos fundamentales para el buen éxito de la misión espacial del transbordador son las comunicaciones. Todos los astronautas han de estar en condiciones de comunicarse fácilmente con sus compañeros y con la estación terrestre. Para ello tienen a su disposición un complejo sistema de comunicaciones.

Arriba, de la despensa de las misiones espaciales se han excluido absolutamente las bebidas alcohólicas. Los astronautas han de contentarse con alimentos deshidratados y bebidas energéticas, pero en absoluto excitantes. Estos dos astronautas, Stafford y Slayton, de la Misión Apolo-Soyuz, pegaron etiquetas de un explosivo vodka ruso a unos tubos de contenido inocuo.

En primer lugar, cada astronauta posee su propio equipo de comunicaciones, formado por un auricular y un micrófono adaptados a la cabeza. Un cable los une a una pequeña unidad de control fijada a los vestidos. Un interruptor permite escoger la comunicación con el interior del transbordador o con la base terrestre. En el compartimento donde vive la tripulación hay ocho interconexiones; en todas ellas es posible conectar el sistema portátil de cada astronauta.



Prueba de los trajes espaciales de los astronautas Peterson y Musgrave sobre la cápsula del Challenger.

Mediante estas interconexiones se puede elegir uno de los cinco canales disponibles y que sirven para hablar desde el transbordador con la Tierra o con el resto de la tripulación del propio transbordador. Si por motivos de trabajo los astronautas no pueden tener cables a su alrededor, utilizan un pequeño transmisor.

¿Y PARA LA SALUD?

A bordo del transbordador hay un botiquín que permite a los astronautas tratar afecciones sencillas o pequeñas heridas que se produzcan durante el vuelo. Además, pueden intervenir eficazmente -pero de manera que, a la vez, sea compatible con las condiciones en las que trabajan- en el tratamiento de enfermedades o heridas graves hasta que el transbordador llegue a Tierra. En el botiquín hay además un desfibrilador, un respirador e instrumentos para detectar el estado de salud de una persona, como un estetoscopio, un aparato para tomar la tensión, un termómetro, etc. El conjunto tiene un peso inferior a los 8 kilogramos.

LA ÓRBITA DE LOS SATÉLITES

Los millares de satélites artificiales que orbitan alrededor de nuestro planeta se ven obligados a viajar según las leyes de la gravitación, como el resto de los cuerpos del sistema solar, pero, además, deben tener en cuenta la presencia de la atmósfera terrestre.



Desde el 4 de octubre de 1957, fecha en que la Unión Soviética puso en órbita el primer satélite artificial Sputnik 1, se han colocado en órbita terrestre o interplanetaria miles de satélites artificiales. Las aplicaciones de las técnicas de observación por satélite y de telemetría se utilizan hoy en muchas disciplinas científicas, actividades económicas y otras situaciones cotidianas. En muchas de estas situaciones, una cuestión primordial y cada vez más importante es la cuidadosa determinación de la órbita y de la posición del satélite. La perspectiva de estaciones espaciales permanentes alrededor de nuestro planeta, con equipos humanos dedicados a actividades de ingeniería, científicas o de control, hace del estudio de las órbitas en presencia de atmósfera uno de los temas de estudio más interesantes en el campo de la tecnología aeroespacial.

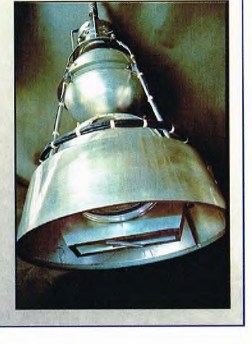
En efecto, además del potencial de la gravedad terrestre, que es, con mucho, la causa de la fuerza de atracción más importante, sobre la órbita de un satélite actúan también la deformación de la esfera terrestre, que está achatada en los polos, y la distribución de las grandes masas continentales en la superficie. Las fuerzas de gravedad ejercidas por la Luna también tienen importancia, mientras que son totalmente insignificantes las del resto de los planetas, incluso la del gigantesco Júpiter. Finalmente, las dimensiones y la forma de un satélite acusan también la fuerza de frenado de la atmósfera terrestre y la presión de la radiación solar. La capacidad de controlar y de predecir los efectos de todas estas causas de aceleración y desaceleración es necesaria para conocer la posición de los satélites con precisión de algunos centímetros. Para el tipo de satélites geodésicos, que se utilizan para medir el desplazamiento de las



Arriba, el complejo MIR es un conjunto de satélites unidos entre sí. Su longitud es de 32 m y su anchura de 27 m. Tiene una masa de 100 toneladas aproximadamente y, en los últimos 10 años, se ha ensamblado con decenas de misiones. Su órbita oscila entre las alturas de 372 y 389 km y puede albergar a dos o tres cosmonautas. Un servicio de dos o tres misiones anuales del transbordador espacial asegura las comunicaciones y el cambio de tripulación. Los primeros cosmonautas llegaron a bordo de la estación MIR el 13 de marzo de 1986.

EL SPUTNIK

El primer satélite que se puso en órbita fue el Sputnik 1. Lanzado el 4 de octubre de 1957 por la Unión Soviética, estaba dotado de un transmisor de señales de radio para estudiar la densidad de la atmósfera superior. Puesto en órbita por un lanzador SS-6, el Sputnik 1 tenía una masa de 83,6 kg, y su órbita, un período de 98,6 minutos. La altura que alcanzó sobre el nivel del mar era de 228 km en el perigeo y de 947 en el punto más alejado. El satélite cayó sobre la Tierra el 4 de enero de 1958, a causa de la acción de la atmósfera.



Después del Sputnik 1, destinado al estudio de la atmósfera, la Unión Soviética lanzó también el Sputnik 2, (en la fotografía).

ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DE LA ÓRBITA

Para trazar una órbita de una sola manera, es necesario conocer sus parámetros orbitales. Geométricamente, hay que definir la posición de una elipse (la órbita propiamente dicha) respecto a un plano de referencia, que es el que pasa por el ecuador terrestre. La Tierra ocupa uno de los focos de la elipse.

1. T_0 o **época** es el día de referencia al que se remiten todos los detalles de la órbita.
2. *i* o **inclinación de la órbita** es el ángulo medido entre el plano de la órbita y el ecuatorial terrestre. Si *i* vale 0°, la órbita está situada en el plano del ecuador, mientras que si vale 90° es perpendicular al plano de referencia ecuatorial. Cuando se indican ángulos mayores de 90° se quiere decir que el movimiento del satélite es contrario al de rotación terrestre, que se produce en dirección antihoraria.
3. Ω o **longitud del nodo ascendente** indica la posición del punto sobre la órbita en la cual el objeto pasa de la parte sur a la norte del plano ecuatorial terrestre. Su medida parte de un punto fijo respecto a las estrellas (el punto de ascensión recta 0, o punto Aries, en el que el Sol es visto desde la Tierra en el momento del equinoccio de marzo), porque la Tierra gira sobre sí misma y no ofrece una referencia adecuada.
4. ω o **argumento del perigeo** es el ángulo medido sobre el plano de la órbita, a partir de la dirección del nodo ascendente y hasta encontrar el punto en el cual la órbita está más próxima a la Tierra, llamado perigeo.
5. *e* o **excentricidad**, que indica cuán achatada está la elipse respecto a una circunferencia. Cuando $e = 0$, la órbita es una circunferencia y la Tierra ocupa su centro. Si $0 < e < 1$, la órbita es una elipse cada vez más achatada hasta que, con $e = 1$, la órbita es una parábola y, por tanto, no está cerrada: un satélite en órbita parabólica se aleja de la Tierra; $e > 1$ significa una órbita hiperbólica, con un alejamiento cada vez más veloz de la Tierra.
6. N_0 o **movimiento medio** es la velocidad media a la que el satélite se mueve en la órbita. Dado que las leyes de Kepler establecen la relación entre la masa de la Tierra, la distancia media del satélite y su velocidad media, fijar el movimiento medio significa también fijar las dimensiones de la órbita. Generalmente, se mide en revoluciones por día, y los valores típicos van del 1 al 16.
7. M_0 o **anomalía media** es el ángulo que indica la posición real del satélite a lo largo de su órbita: por definición, $M_0 = 0°$ en el perigeo, y $M_0 = 180°$ en el apogeo, el punto más lejano de la órbita.
8. N_1 o **resistencia aerodinámica** deriva del efecto de la atmósfera sobre la velocidad del satélite, que, por fricción, tiende a detenerse. El destino final de la órbita de un satélite artificial terrestre es tocar la superficie de la Tierra, pronto o tarde en relación con el valor de N_1. Este parámetro también se mide en revoluciones/día: equivale aproximadamente a 1/10.000 r/d para los satélites en órbita baja, y 1/10.000.000 r/d para los de órbitas más altas.
9. La **actitud** (o coordenadas de Bahn) es una medida del modo en que el satélite está orientado en el espacio respecto a la dirección de la superficie terrestre. Sirve a los controladores de la órbita para orientar el satélite hacia una antena receptora especial o hacia el objetivo.

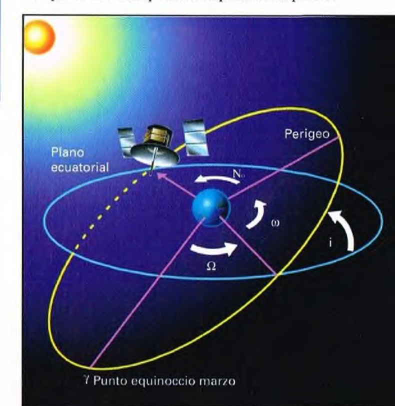
placas tectónicas de nuestro planeta, es indispensable disponer de una exactitud así. De todos modos, la descripción geométrica de la órbita sigue la descripción kepleriana de la órbita simple de un cuerpo de masa desconocida alrededor de otro (en este caso la Tierra) de masa conocida. Se incluyen las perturbaciones no gravitatorias y se utilizan complejos programas de simulación para el seguimiento de los satélites con las antenas de comunicación de las estaciones terrestres.

LOS SATÉLITES GEOESTACIONARIOS

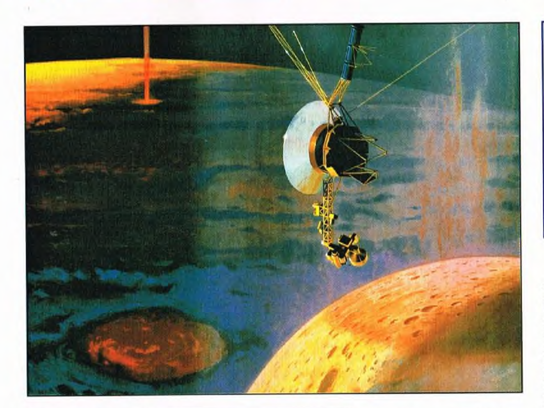
La velocidad de revolución que ha de mantener un satélite para permanecer fijo en su órbita sólo depende de la masa del cuerpo celeste a cuyo alrededor gira (en nuestro caso, la Tierra, con sus $5{,}98 \times 10^{24}$ kg) y del radio medio de la órbita. Cuanto más próximo está un satélite a la superficie terrestre mayor ha de ser su velocidad para equilibrar exactamente la fuerza de atracción gravitatoria, que es más elevada cuanto mayor es la proximidad a la Tierra. Un satélite ideal que viaje a nivel del mar efectuaría una revolución entera en una hora. Si, en cambio, la órbita es muy alta, de manera que coincidan el período de revolución del satélite con el de rotación terrestre, el satélite efectuaría una vuelta exactamente en un día. Éste es el caso de los satélites geoestacionarios, o en órbita geosíncrona, cuya altura desde la superficie terrestre es de 35.800 km (aproximadamente una décima parte de la distancia Tierra-Luna). Para este tipo de satélites se ha elegido una inclinación muy próxima a cero grados, a fin de que permanezcan siempre en la misma posición respecto a la superficie



Arriba, aspecto de la Tierra captado permanentemente por las telecámaras del satélite Meteosat-3, en órbita geoestacionaria sobre la vertical del continente africano. Junto a otros dos satélites, uno sobre las Américas y otro sobre Oceanía, mantiene bajo control las condiciones meteorológicas de todo el planeta.



A la derecha, el dibujo muestra el aspecto geométrico de los principales elementos orbitales. La dirección de referencia γ es la del equinoccio de marzo, tal como se utiliza para las órbitas de los planetas.





Arriba, representación del Voyager 1 aproximándose a Júpiter.

A la izquierda, esta fotografía se obtuvo dejando abierto el objetivo durante algunos minutos y apuntándolo hacia el cielo estrellado. Los trazos cortos son, en realidad, estrellas que se mueven por efecto de la rotación terrestre. El trazo largo, casi vertical, lo dejó un satélite al atravesar el campo de visión.

terrestre. De este modo, desde la Tierra los vemos siempre en el mismo punto del firmamento, y una telecámara colocada en ellos encuadra siempre la misma parte de superficie terrestre. Se colocan en esta órbita los satélites meteorológicos, como el Meteosat, que tienen bajo su control constante una tercera parte aproximadamente de la superficie de la Tierra.

LA NAVEGACIÓN INTERPLANETARIA

Los problemas de la navegación de las sondas interplanetarias difieren de los que presenta la dinámica ordinaria con un solo planeta central. En realidad, el campo gravitatorio está generado por las masas del Sol y de los planetas, uno de los cuales ha de considerarse preponderante en el cálculo de la órbita. En la práctica, la cápsula espacial debe cambiar su órbita varias veces: de una órbita terrestre normal pasa a una órbita de escape del campo gravitatorio terrestre, aumentando su velocidad y entrando en una órbita generalmente hiperbólica que lo lleva al campo de influencia del planeta de destino. Allí, ha de disminuir su velocidad para entrar en una órbita dependiente del nuevo planeta.

INTERNET

Los grupos de observadores de satélites han entrado naturalmente en el mundo virtual de la red Internet. Un sitio de Internet cuya visita resulta especialmente interesante es el de Visual Satellite Observer. Superado el obstáculo del idioma inglés, se podrá acceder a muchas informaciones útiles y también a programas para ordenadores personales preparados para la búsqueda de los satélites más importantes. Para ello, hay que utilizar la dirección WWW http:/ /www2.plasma.mpc-garching.mpg.de/sat/

La aceleración necesaria para cambiar la órbita es, a veces, demasiado elevada para las tecnologías de la ingeniería espacial. Se recurre entonces al llamado efecto honda, que aprovecha la gravedad de un planeta intermedio para aumentar la velocidad y cambiar la dirección del vehículo espacial. En la práctica, el planeta captura temporalmente la cápsula y la suelta, lanzándola velozmente ante sí, a expensas de la energía del propio planeta.

A LA CAZA DE SATÉLITES

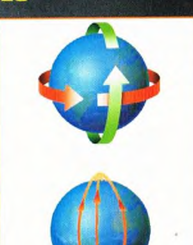
Muchos apasionados astrófilos y también radioaficionados utilizan pequeños programas para el cálculo de las órbitas de los satélites a fin de esperarlos y observar su estela en el cielo vespertino o matutino.

Un gran número de satélites de órbitas bajas son más luminosos que la mayor parte de las estrellas, y no es raro ver unos 10 de ellos si permanecemos durante una hora contemplando el cielo estrellado. Pero prever la llegada de la estación espacial MIR o del transbordador espacial, o bien hallarlos puntualmente en la bóveda celeste es mucho más emocionante. Los radioaficionados pueden, en estos momentos de visibilidad, que duran varios minutos, intentar comunicarse por radio con los astronautas de a bordo, que en sus momentos de descanso suelen intercambiar gustosamente algunas frases con los terrestres de a pie.



ÓRBITAS POLARES Y ECUATORIALES

Si la inclinación de la órbita de un satélite es de 0° o próxima a cero, se dice que el satélite está en órbita ecuatorial (en la figura, en rojo). La órbita señalada en verde es, en cambio, una órbita polar, que pasa por encima de los polos Norte y Sur terrestres y tiene una inclinación de 90°. El empleo de órbitas polares es frecuente en los satélites para estudios geológicos y ambientales, ya que, aprovechando que, debajo, la Tierra gira sobre su eje, los sensores de a bordo pueden inspeccionar todos los rincones del planeta. La órbita, vista desde un punto fijo de la Tierra, resultaría ser la que se muestra en la figura inferior.





EN EL PRÓXIMO NÚMERO

EL SISTEMA SOLAR

LOS ANILLOS DE SATURNO

ESTRELLAS Y GALAXIAS

ESTRELLAS NEONATAS

GUÍA DE LAS CONSTELACIONES

VIRGO

CÓMO FUNCIONA EL UNIVERSO

LA EMISIÓN INFRARROJA

LA EXPLORACIÓN DEL ESPACIO

EL CIELO FRÍO

EL UNIVERSO

ENCICLOPEDIA DE LA ASTRONOMÍA Y EL ESPACIO

20



PLANETA DeAGOSTINI



COMPOSICIÓN DE LA OBRA

Volumen 1	Fascículos 1	al	16
Volumen 2	Fascículos 17	al	32
Volumen 3	Fascículos 33	al	48
Volumen 4	Fascículos 49	al	64
Volumen 5	Fascículos 65	al	80

VENTA EN QUIOSCOS

Pida a su proveedor habitual que le reserve un ejemplar de EL UNIVERSO. Adquiriéndolo todas las semanas en el mismo punto de venta facilitará la distribución y obtendrá un mejor servicio.
Las tapas correspondientes a cada volumen se ponen a la venta con el fascículo que cierra el tomo. Con dicho fascículo se entregan las portadillas correspondientes.

Presidente: José Manuel Lara
Director General: Carlos Fernández
Director Editorial: Virgilio Ortega
Director General de Producción: Félix García
Coordinador General: Carles Dorico

© Editorial Planeta Argentina S.A.I.C.
Av. Independencia, 1668 - Capital Federal
Servicio de atención al cliente: Tel. (01) 482 - 0655 y 482 - 0657
Distribuye: Capital: Huesca-Sanabria,
Baigorri, 103, Capital Federal,
Interior: D.G.P., Alvarado, 2118, Capital Federal

© Editorial Planeta Mexicana, S.A. de C.V.
Av. Insurgentes Sur # 1162 - México D.F.
Servicio de atención al cliente: Tel. 575 13 48

© Editorial Planeta Colombiana, S.A.
Carrera, 68, n.º 25-55 - Santa Fé de Bogotá, D.C.
Servicio de atención al cliente: Tel. 9800 - 15315

© Editorial Planeta Chilena, S.A.I.C.
Olivares, 1229 - Santiago de Chile

ISBN Obra completa (con vídeo): 84-395-4148-1
Obra completa (sin vídeo): 84-395-4138-4
Fascículos (con vídeo): 84-395-4149-X
Fascículos (sin vídeo): 84-395-4139-2
Depósito legal: B-47.097-1997

Impresión: Cayfosa, Santa Perpètua de Mogoda, Barcelona
Impreso en España - Printed in Spain - Mayo 1998

Los editores se reservan el derecho de modificar el precio de venta de los componentes de la colección en el transcurso de la misma, si las circunstancias así lo exigieran.
Los editores garantizan la publicación de todos los fascículos que componen esta obra.

Fotografías: Lee Gibbons: cubierta, 116-117, 116ab., 117ar.; ESA/SPL: 107c.der.; E.T. Archive: 106ar.; Galaxy Picture Library: 101, 104, tercera de cubiertas; IGDA: 107ar.der.; Science Photo Library/Julian Baum: 106-107; Dr. Jeremy Burgess: 103 der.; Range: 111; Hugh Rowland: 110; Spectrum: 110, 111; US Naval Observatory: 112ar.izq.; Bristock-IFA: 114-115; BNSC/ESA: 118ab.; ESA: 118-119, 119ab., 120c.; Tony Stone Picture Library: 120ab.
Dibujos: Robin Carter/WLAA: 104-105, 117ab.; David A. Hardy: 102-103; Hugh Rowland: 105, 106ab., 120; Katz: 108-109; Sandra Russell/Black Hat: 112ar.; Julian Baum: 113; Farroxs: 116ar.; Robin Bottel: 115ab.; Spectrum Picture Library: 114ab.

LOS ANILLOS DE SATURNO

Los anillos de Saturno, unos objetos astronómicos notables y característicos, están formados por un número enorme de cuerpos pequeñísimos.

Los anillos son, sin duda alguna, el aspecto más espectacular de Saturno tanto si se observa desde la Tierra como a través de las imágenes enviadas por las sondas que se han aventurado por las cercanías del gigante gaseoso.

Los anillos orbitan alrededor del plano ecuatorial, y este plano está inclinado unos 28° respecto a aquel en el cual Saturno orbita en torno al Sol. Esto significa que desde la Tierra los anillos adoptan un aspecto diferente según las posiciones recíprocas de los dos planetas; es posible, pues, observarlos de perfil o verlos a lo ancho.

COMPOSICIÓN

Los anillos están formados por un número enorme de pequeñísimos cuerpos que poseen un alto coeficiente de reflexión: por esto son visibles a gran distancia. Pese a que el espesor de los anillos es muy pequeño, su brillo supera el del disco planetario. Entre las partículas que forman los anillos figuran cristales de hielo; hay, además, mucho material rocoso recubierto de hielo. La estructura de los anillos es muy delgada, con un diámetro de más de 275.000 km y un espesor no superior a un kilómetro. La masa total de los anillos es muy pequeña: el cuerpo formado por su acumulación tendría un diámetro inferior a los 100 kilómetros.

UNA OBSERVACIÓN PRÓXIMA

Observando el sistema de anillos se distinguen tres formaciones principales, llamadas por comodidad anillos A, B y C, y otros cuatro anillos menores definidos también mediante letras del alfabeto.

En la imagen a toda página, encuadre, tomado por la sonda Voyager, del planeta Saturno rodeado por sus anillos.

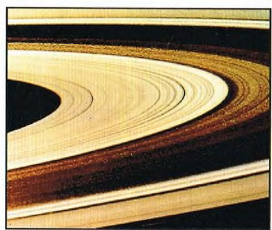


Arriba, el planeta Saturno no es el único rodeado de anillos, pues también los poseen Júpiter, Urano y Neptuno; sin embargo, los anillos de Saturno son más notables y por ello se pueden observar mejor.

El anillo B es el central, más ancho y brillante; en su interior se encuentra el anillo C, casi transparente, mientras que el anillo A es más exterior que el B.

La estructura no es continua, pues los anillos aparecen separados por una serie de zonas oscuras que se conocen como divisiones.

La división mayor, que separa los anillos B y A, toma el nombre del famoso astrónomo italiano Gian Domenico Cassini; otra división importante es la de Encke, que se encuentra en el interior del anillo A.



Arriba, zona anular de Saturno con luz difusa, en una toma próxima.

ESTRUCTURA FINA

Las observaciones modernas han puesto de manifiesto que los anillos están formados a su vez por muchísimos subanillos muy delgados separados por divisiones; algunos son nítidos y poco extensos, mientras que otros son difusos y menos definidos. La sonda Voyager 1, que se acercó a Saturno, logró fotografiar los anillos y confirmar la presencia de estas estructuras.

Los científicos creen que las lagunas pudieron haber sido creadas por minúsculos satélites que orbitan dentro de los anillos y que con su presencia barrieron un cinturón de partículas; una de estas lagunas ha sido hallada en el límite interno de la división de Cassini.

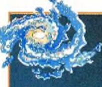
Las imágenes y los datos recogidos por la sonda Voyager 2 han permitido confirmar la existencia de estas estructuras, pero las fotos de alta resolución de dicha zona (la orilla interna de la división de Cassini) no han mostrado la presencia de satélites de mayor tamaño que 5-9 km. No ha sido posible realizar ninguna investigación sistemática ulterior de las demás divisiones de los anillos.

LA DIVISIÓN DE CASSINI Y LAS RESONANCIAS

Entre los anillos B y A se extiende la división más grande del sistema, cuya anchura es de 4.600 kilómetros.

Al contrario de lo que se creía, en su interior hay estructuras secundarias, aunque con un material muy escaso; hacia el borde interno hay además un delgado anillo excéntrico similar al que está presente en el anillo C.

Para explicar la presencia de estas zonas de densidad tan baja (las divisiones), numerosas en todos los anillos, hay que recurrir al concepto de resonancia. Si el cociente entre los períodos de revolución de dos cuerpos se puede expresar como un cociente de números enteros se dice



HIPÓTESIS HISTÓRICAS SOBRE LA NATURALEZA DE LOS ANILLOS

El primero en reconocer la naturaleza de los anillos fue Pierre Simon de Laplace, quien ya en 1785 conjeturó que estaban formados por partículas. Laplace afirmaba que se trataba de estructuras constituidas por innumerables cuerpos sólidos de pequeñas dimensiones que orbitaban alrededor de Saturno y que daban la impresión de una estructura continua. En 1856, James Clerk Maxwell demostró que estos pequeños cuerpos estaban distribuidos en estructuras menores adyacentes, anulares y de anchura no comparable a la de los anillos mayores. Demostró además que estos anillos menores tienen la posibilidad de oscilar, realizando pequeños desplazamientos alrededor de una posición de equilibrio. Otra contribución fundamental fue la del matemático Edouard Roche, quien probó la imposibilidad, para un cuerpo no demasiado pequeño, de orbitar a menos de una cierta distancia de un planeta sin correr el riesgo de quedar destruido por el campo gravitacional del cuerpo mayor. La zona «prohibida» para los satélites tiene un radio equivalente a 2,44 veces el radio de Saturno y su borde externo se llama límite de Roche. Calculando el límite para Saturno, los astrónomos advirtieron que estaba situado un poco más allá del anillo más externo, una ulterior confirmación de que los anillos debían estar formados por cuerpos muy pequeños.

que las dos órbitas están en resonancia. Si un período es el triple del otro, los dos cuerpos estarán en una resonancia 1:3 (de uno a tres). El que algunas zonas estén casi vacías depende de las partículas, que en aquellas regiones sienten más intensamente la atracción gravitacional de los satélites más externos y se mueven hacia estos cuerpos mayores, vaciando la región afectada. Los satélites de esta clase se llaman satélites pastores.

EL FOTOPOLARÍMETRO DE LA SONDA VOYAGER 2

El fotopolarímetro de la sonda Voyager 2 brindó otras sorpresas. El instrumento midió un cambio de luminosidad de una estrella, Delta *Scorpionis*, cuando la sonda se encontraba encima de los anillos y la luz de la estrella le llegaba pasando a través de ellos. De este modo, el fotopolarímetro logró resolver estructuras más pequeñas que 300 m. El experimento de la ocultación estelar demostró que existen pocas divisiones nítidas dentro de los anillos. Las estructuras interiores de los anillos, como en el caso del mayor (B), parecen ser variaciones de ondas de densidad y otras ondas estacionarias. Las ondas de densidad están producidas por los efectos gravitacionales de los satélites de Saturno. Por ello, la estructura a pequeña escala de los anillos puede ser transitoria, mientras que las características a mayor escala, como las divisiones de Cassini y Encke, son permanentes.

Los bordes de los anillos donde hay pocas divisiones son tan nítidos que en aquellas zonas el espesor de los anillos no debe rebasar los 200 metros.

En casi todos los casos donde aparecen divisiones evidentes en los anillos hay también anillos muy delgados de órbita excéntrica, que muestran variaciones de luminosidad. Las diferencias se deben a la densificación y al cruce de órbitas, o, al contrario, a la casi total ausencia de material.

Anillo D
Anillo C
Anillo B
División de Cassini
Anillo A
División de Encke
Anillo F
Anillo G
Anillo E

DATOS

ANILLOS DE SATURNO DEL INTERIOR AL EXTERIOR

Anchura anillo D: 7.000 km
Anchura anillo C: 13.000 km
Anchura anillo B: 25.600 km
Anchura anillo A: 14.600 km
Anchura anillo F: 300 km
Anchura anillo G: 300 km
Anchura anillo E: 302 km
Anchura división de Cassini: 4.600 km
Anchura división de Encke: 325 km

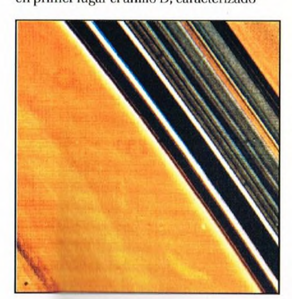
Arriba, en el esquema de la estructura de los anillos de Saturno se distinguen los anillos D, C, B, A, F, G y E. Entre los anillos B y A, y A y F se encuentran, respectivamente, las divisiones de Cassini y de Encke.

Algunos científicos creen que la única explicación plausible de estos fenómenos es la presencia de satélites pastores todavía no descubiertos en aquellas zonas.

LOS ANILLOS D Y C

Conforme nos alejamos de las regiones más próximas al disco de Saturno encontramos en primer lugar el anillo D, caracterizado por una luminosidad muy baja. Muy probablemente, la parte más interna del anillo termina en los estratos superiores de la atmósfera de Saturno.

El anillo que lo sigue hacia el exterior es el C, más ancho y complejo que el anterior. Las imágenes de las sondas Voyager ponen de manifiesto que en su interior hay numerosas bandas de subanillos secundarios menos transparentes. En la parte exterior del anillo C hay una laguna de unos 270 km precedida y seguida por dos anillos con los bordes muy nítidos. Dentro de la laguna se ha descubierto un anillo pequeño, excéntrico (su centro no coincide con el del planeta), cuya anchura varía entre los 35 y los 90 km. Los cuerpos que componen el anillo C tienen diámetros que llegan a los dos metros.



A la izquierda, esta imagen en colores artificiales de los anillos ha sido tomada por la sonda Voyager 2 a alta resolución.

EL ANILLO B

En la frontera entre el anillo C y el anillo B se encuentra una zona pobre en partículas, de unos 3.600 km de anchura, llamada división francesa.

Arriba, los aparatos a bordo de la sonda Voyager 1 tomaron esta insólita y sugestiva imagen de Saturno (a la derecha) y de sus anillos.

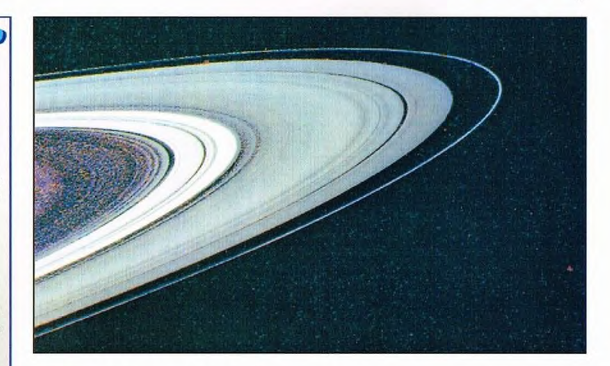
El anillo B es la formación principal de todo el sistema (25.600 km) y también la más visible; esta región es la que registra la mayor concentración de corpúsculos.

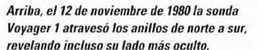
El cuerpo principal está dividido en numerosos anillos más pequeños y divisiones; el tamaño de los cuerpos que los componen varía entre unos pocos metros y decenas de kilómetros.

En la parte externa del anillo (últimos 10-15.000 km) están presentes además unas extrañas estructuras llamadas manchas radiales. Estas manchas tienen más o menos la forma de triángulos estrechos con la base vuelta hacia el planeta; los materiales presentes en su interior son muy pequeños, del orden de la micra. No son estructuras permanentes pero tienen una duración de unas 10 horas; su presencia sería debida a la interacción entre las

LA MEDIDA DEL DIÁMETRO DE LAS PARTÍCULAS DE LOS ANILLOS

Como ya se ha explicado, los anillos de Saturno están compuestos por un gran número de pequeños cuerpos. Para estimar el tamaño medio de los objetos, los científicos de la NASA han utilizado un medio muy ingenioso que aprovecha la difracción de las ondas electromagnéticas (luz) por parte de los cuerpos sobre los que inciden los rayos luminosos. Si el diámetro de las partículas es menor o del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de la luz incidente, la radiación electromagnética se dispersa en todas direcciones; en cambio, si los tamaños son mayores, la luz se refleja preferentemente hacia delante. Dado que la longitud de onda de la luz es conocida, el diámetro de las partículas que componen los anillos se ha podido medir comparando las imágenes tomadas por las sondas que se acercan al sistema (luz dispersada hacia delante) con las de las sondas que se alejan (luz dispersada hacia atrás).





Arriba, el 12 de noviembre de 1980 la sonda Voyager 1 atravesó los anillos de norte a sur, revelando incluso su lado más oculto.

moléculas de agua (presente en forma de hielo) ionizadas y el campo magnético de Saturno. Cuando los electrones que vagan por las cercanías del anillo neutralizan los iones, las formaciones desaparecen.

Cerca del borde externo del anillo B se han fotografiado además algunos anillos excéntricos de tamaños diversos, similares a los del anillo C.

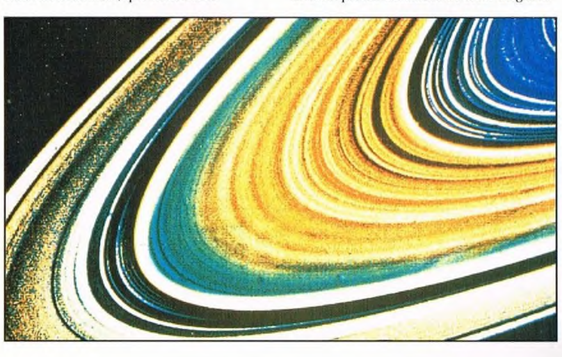
EL ANILLO A

Más allá de la división de Cassini se extiende el anillo A, que tiene como característica la presencia en su interior de una laguna llamada división de Encke en honor de su descubridor, director del observatorio de Berlín. La división está cerca del borde exterior del anillo y es una región cuyo período de revolución está en resonancia con el satélite Mimas, si bien en su interior se han encontrado algunos anillos muy delgados e irregulares.

EL ANILLO F

El anillo F de Saturno fue descubierto por la sonda Pioneer en 1979. Las fotos de este anillo tomadas por el Voyager mostraron tres anillos pequeños separados que aparecían trenzados. A una resolución más elevada, la sonda Voyager 2 halló cinco subanillos ulteriores en una región que parecía homogénea. El fotopolarímetro de la sonda descubrió que el subanillo más luminoso del anillo F estaba a su vez subdividido en al menos 10 filamentos. Se cree que los trenzados de estas delgadas estructuras se deben a las perturbaciones gravitacionales producidas por los dos satélites pastores que se encuentran en sus proximidades, uno interior y el otro exterior.

En el anillo F las concentraciones de materia están distribuidas de forma uniforme a lo largo del anillo cada 9.000 km, una distancia que casi coincide con el movimiento relativo de las partículas respecto al más interno de los satélites pastores durante un período orbital. Por analogía, un mecanismo similar podría operar en los delgados anillos presentes en la división de Encke.



CONCLUSIÓN

Un último desafío a la comprensión del sistema procede de la variación del radio de los anillos; la forma elíptica del límite externo del anillo B, por ejemplo, no sigue una órbita kepleriana porque Saturno se encuentra en el centro de la elipse y no en uno de sus focos. Probablemente los efectos gravitacionales de Mimas, satélite que está en resonancia con el borde del anillo, son los responsables de la forma elíptica, lo mismo que de la variación de tamaño de la división de Huygens entre el anillo B y la división de Cassini.

En definitiva, las mayores sorpresas y los interrogantes más difíciles que han planteado las dos sondas Voyager en su encuentro con Saturno tienen que ver con las observaciones de los anillos.

Los anillos más brillantes tienen una anchura total de unas cinco veces y media el diámetro terrestre y un espesor de pocos cientos de metros.

ESTRELLAS NEONATAS

¿Es posible para los astrónomos modernos observar el nacimiento de estrellas? Con los sofisticados instrumentos de la tecnología contemporánea se consigue sondear las nubes dentro de las cuales se forman los astros.



Captar el instante en que se forma una estrella es uno de los momentos más significativos para un astrónomo. El telescopio espacial Hubble ha permitido ver en detalle por primera vez embriones estelares dentro de la gran nebulosa del Águila, la cual, como una inmensa maternidad celeste, los custodia hasta el momento del primer vagido.

DÓNDE NACEN LAS ESTRELLAS

Todas las estrellas se forman como consecuencia de contracciones gravitatorias de enormes nubes de gas presentes en el medio interestelar, cuya masa es igual a decenas de miles de masas solares. La composición química de la nube interestelar no siempre es la misma; depende de su edad y de su situación en la galaxia. Las nubes gaseosas primordiales, de las cuales nacieron las primeras poblaciones estelares de nuestra Galaxia, estaban principalmente formadas de hidrógeno, el elemento químico más abundante del universo, y de helio, derivado de la nucleosíntesis cosmológica. Las nebulosas de más reciente formación constan también de un porcentaje menor de átomos más pesados y moléculas. Los átomos más pesados que el helio fueron sintetizados en el interior de estrellas masivas pertenecientes a generaciones precedentes. Al término de su ciclo evolutivo, estas estrellas explotan como supernovas y la materia que las constituye se dispersa por el medio interestelar, enriqueciendo su composición química. Las nebulosas no sólo contienen hidrógeno y átomos pesados sino también partículas microscópicas de polvo interestelar (grafito, silicatos y otros compuestos químicos similares a los que se encuentran en la Tierra o las rocas lunares). Son precisamente estas partículas las que, actuando como catalizadores, favorecen la agregación de los átomos y las moléculas del gas interestelar durante los varios estadios de formación de una estrella. Por desgracia, estas

En la imagen a toda página, una representación pictórica de las estrellas jóvenes todavía rodeadas de los restos del gas a partir del cual se han formado.

mismas partículas nos impiden observar con claridad qué sucede dentro de la nebulosa. Pese a que la cantidad total de polvo representa sólo una mínima fracción de la masa total, estas partículas tienen un tamaño superior al de los átomos de gas, por lo que están en condiciones de absorber de forma más eficaz la luz emitida por las estrellas. Por este motivo, la búsqueda de las estrellas en vías de formación, o protoestrellas, se realiza casi exclusivamente en la región infrarroja del espectro electromagnético, donde los efectos de la absorción son menores. Naturalmente, para que los procesos de formación estelar puedan tener lugar, dentro de la nebulosa deben darse unas condiciones especiales de temperatura y densidad. El gas, por ejemplo, debe ser lo bastante denso para poder condensarse; al mismo tiempo, la temperatura de la nebulosa debe ser lo suficientemente baja para impedir que el gas se pierda en el espacio interestelar por efecto de su propio movimiento caótico. Cuando se cumplen estas condiciones, los átomos de hidrógeno de la nebulosa quedan libres para unirse entre sí formando moléculas de hidrógeno molecular (H_2). Este proceso, que constituye el primer paso para el nacimiento de la nueva estrella, pone en marcha la formación de agregados gaseosos, que se van volviendo cada vez más pesados y densos a medida que se acumula cada vez más materia nebular. Una vez alcanzada una cierta masa crítica, las condiciones de presión y temperatura son tales que comienzan las reacciones de fusión del hidrógeno. En nuestra Galaxia se han observado algunas nebulosas en las cuales los procesos de formación estelar están aparentemente en plena actividad. La mayoría de estas nebulosas están dentro de los brazos espirales, donde el movimiento de rotación de la Galaxia ha



A la derecha, una bella imagen fotográfica de M16, la nebulosa del Águila, que se encuentra en la parte de la cola de la constelación de la Serpiente.



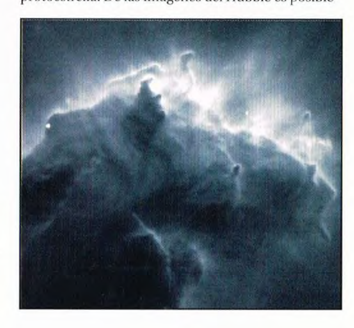
acumulado buena parte de la materia desperdigada por el medio interestelar. Observadas al telescopio, dichas nebulosas aparecen como fuentes extensas muy luminosas a causa de la luz difusa de las estrellas de su interior que las hacen brillar.

Arriba, columnas de gas en el interior de la nebulosa del Águila (M16) tomadas por la Wide Field and Planetary Camera 2, a bordo del telescopio espacial Hubble. Los colores de la imagen han sido reconstruidos artificialmente por ordenador sumando exposiciones tomadas con distintos filtros.

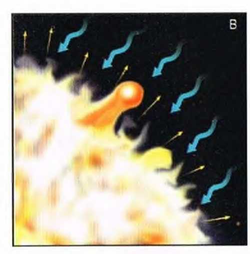
EMBRIONES DE ESTRELLAS

Una de las regiones de nuestra Galaxia donde los procesos de formación estelar son más activos es la llamada nebulosa del Águila, situada a una distancia de unos 7.000 años luz, en los límites entre las constelaciones de Sagitario y la Serpiente. Esta nebulosa se encuentra en el hemisferio meridional y es lo bastante luminosa como para poder observarla con unos prismáticos. Su nombre deriva de su forma particular, que recuerda un ave de presa con las alas extendidas y las garras proyectadas hacia delante. Las garras de la nebulosa están formadas por tres densas columnas de gas, de algunos años luz de tamaño, que emergen de las regiones centrales en dirección a un vecino cúmulo de estrellas masivas recién nacidas. La nebulosa del Águila también es conocida con el nombre menos pintoresco de M16, que, como su nombre indica, ocupa el decimosexto lugar en el catálogo de Messier, la famosa lista de objetos galácticos y extragalácticos compilada hace unos 200 años por el astrónomo francés Charles Messier. Las imágenes más detalladas de las regiones de formación estelar en la nebulosa del Águila captadas recientemente por el telescopio espacial Hubble han permitido determinar la presencia de un centenar de estrellas en estado embrionario. Las imágenes de alta resolución del Hubble muestran con claridad estructuras más pequeñas y densas en los vértices de estas columnas, constituidas por glóbulos compactos de gas y polvo interestelar. Son precisamente estas estructuras menores, de tamaño comparable al de nuestro sistema solar, las que hospedan las estrellas nacientes. En particular, la forma más alargada de estos glóbulos de gas parece indicar que están adelgazando cada vez más, para desprenderse luego de la estructura principal. Este efecto es debido a la presencia de estrellas azules pertenecientes a un cúmulo vecino. Se trata de estrellas más masivas que el Sol y por lo tanto también más calientes y brillantes. Las mayores deberían ser unas 10.000 veces más brillantes y con temperaturas superficiales 10 veces mayores (50.000 grados); por este motivo, estas estrellas emiten la mayor parte de su luz en forma de radiación ultravioleta. La radiación ultravioleta emitida por estas estrellas calienta las paredes externas; los glóbulos emiten el gas en exceso y ponen al desnudo los núcleos. El mecanismo se llama fotoevaporación. Dicho fenómeno también ha dado nombre a las propias estructuras, que se llaman simbólicamente EGGs, de las iniciales del inglés *Evaporating Gaseous Globules*, glóbulos de gas en proceso de evaporación. En realidad, la elección del nombre contiene un divertido juego de palabras, ya que la palabra «*egg*» en inglés significa huevo, un término de lo más indicado para un embrión estelar. El descubrimiento de los EGGs, como desde ahora los llamaremos por simplicidad, es importante para la física estelar porque permite comprender mejor cuáles son los procesos que controlan la masa de las estrellas en el momento de su formación. Antes de las observaciones del Hubble, se creía que la distribución de masa de las estrellas estaba determinada exclusivamente por las condiciones locales de densidad dentro de las nebulosas. Glóbulos más densos eran el preludio a la formación de estrellas más masivas y a la inversa. En realidad, las condiciones ambientales no son el único factor determinante. Como hemos visto, la fotoevaporación de los glóbulos en M16 regula la acreción de materia por parte de los embriones estelares y contribuye así a determinar la cantidad de materia que participa en el colapso final, y por tanto, la masa efectiva de la protoestrella. De las imágenes del Hubble es posible

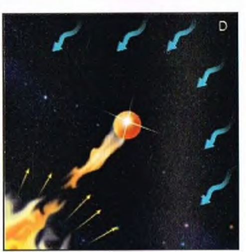
A la derecha, un detalle próximo de la nebulosa M16. En el extremo de las delgadas columnas de gas visibles en la imagen se están formando nuevas estrellas, las cuales se van separando lentamente de la nube barriendo el gas circundante.











deducir también que la estructura de los EGGs no es uniforme y que, por consiguiente, la fotoevaporación no se produce siempre con la misma intensidad. Los EGGs cuyo núcleo tiene una densidad más elevada tienden a evaporarse en una medida mucho menor bajo los efectos de la acción ultravioleta y a conservar casi intacta su masa. A la inversa, los menos densos tienden a sufrir en mayor medida el proceso de erosión, y la estrella que de ellos resultará tendrá una masa inferior. En algunos casos extremos, la acreción de materia en torno a los glóbulos puede quedar inhibida antes de que la protoestrella alcance la masa mínima necesaria para la puesta en marcha de las reacciones de fusión. Estos procesos son muy distintos de los que regulan la formación de las estrellas en ambientes aislados, donde la acreción de materia desde el medio interestelar no está limitada por factores externos y prosigue casi imperturbada hasta el momento de la ignición de las reacciones nucleares dentro de la protoestrella. En este punto, la estrella misma limita el incremento de materia lanzando al exterior el gas residual. Este fenómeno ha sido observado en algunas estrellas jóvenes llamadas objetos de Herbig-Haro.

Arriba, esquema de la formación EGGs en la nebulosa del Águila: A) la superficie de la nebulosa es iluminada por la intensa radiación ultravioleta emitida por las estrellas vecinas azules, lo cual provoca la evaporación del gas; B) a medida que la nube se va evaporando, empiezan a aparecer glóbulos de gas de densidad cada vez mayor; C) el EGG se está separando del cuerpo principal de la nube dejando tras de sí una delgada banda de gas; D) el EGG se desprende completamente de la nube y se convierte en un cuerpo separado: son las fases anteriores al nacimiento de la nueva estrella. A la derecha, el objeto CRL 2688 es un ejemplo de EGG. Se trata de un capullo gaseoso que contiene una estrella en formación, la cual está barriendo de las regiones circundantes el gas que le ha dado origen.

LOS OBJETOS DE HERBIG-HARO

Los objetos de Herbig-Haro son regiones globulares de gas débilmente luminosas que muestran líneas de emisión en el espectro debidas, por ejemplo, al hidrógeno y al azufre ionizado. Se cree que derivan de la interacción entre el viento estelar a alta velocidad emitido por una estrella en formación a lo largo de su eje de rotación y una nube de gas interestelar más densa. Los chorros son frenados bruscamente formando ondas de choque que calientan el gas y lo vuelven visible. Los objetos HH suelen estar asociados a chorros altamente colimados de materia expulsados en direcciones opuestas a velocidades de cientos de kilómetros por segundo.

ESTRELLAS NEONATAS

Estos objetos toman el nombre de dos astrónomos, el estadounidense George Herbig y el mexicano Guillermo Haro, quienes a comienzos de los años cincuenta catalogaron independientemente muchas nebulosidades en torno a algunas estrellas de la nebulosa de Orión. Actualmente, se han identificado unos 300 objetos de este tipo. Sólo en los últimos 20 años, sin embargo, se ha determinado la verdadera naturaleza de los objetos de Herbig-Haro y su colocación ideal en la secuencia temporal de evolución estelar. Estas nebulosidades se caracterizan por estructuras rectilíneas, las cuales, verosímilmente, representan chorros de gas caliente que se propaga a alta velocidad a partir de la estrella naciente. La formación de estos chorros representaría un fenómeno típico de los estados conclusivos en la génesis estelar. Según las más recientes teorías, el nacimiento de una nueva estrella se produce cuando una nube de materia en lenta rotación colapsa sobre sí misma bajo la acción de la fuerza de la gravedad. El colapso de la nube provoca en torno a la protoestrella la formación de un disco de gas y polvo en rotación que, alimentándola de manera regular, media en el proceso de acreción. Cuando las condiciones de temperatura dentro de la protoestrella llevan a la ignición de las reacciones nucleares, parte del disco es irradiado por la intensa radiación producida. Este proceso produce una disgregación parcial del propio disco y hace que parte de la materia circumestelar sea eyectada en forma de chorros alineados a lo largo del eje de rotación de la estrella. Los chorros observados en torno a los objetos de Herbig-Haro representan en cierto sentido material de descarte del proceso de formación estelar. Una peculiaridad de estos chorros de materia es que aparecen





A la izquierda, imagen de los chorros de materia alrededor de HH-47, tomada por el Hubble. El objeto ha sido observado en la constelación de la Vela, a una distancia de 1.500 años luz, casi al borde de la nebulosa Gum, un viejo resto de supernova. La estructura complicada del chorro indica un posible movimiento ondulatorio de la estrella, posiblemente causado por la interacción gravitacional con una compañera invisible.

confinados en conos muy delgados que se extienden hasta miles de millones de kilómetros de la superficie de la estrella. Actualmente, todavía no está claro cuáles son los mecanismos físicos que provocan su confinamiento, aunque probablemente el campo magnético de la estrella tiene un papel relevante. Pese a estar alimentados durante un período relativamente breve de la vida de la estrella (unos 100.000 años), estos chorros provocan una pérdida de masa significativa por parte de la propia estrella y juegan un papel importante en la determinación de su masa final y de su evolución ulterior. Es precisamente la masa de la estrella la que controla su temperatura, su longevidad y su destino final.

La estructura de estos chorros se estudia en detalle, una vez más, a través de las imágenes tomadas por el telescopio espacial Hubble, el cual ha permitido observar por primera vez la presencia de discos de materia en formación y de chorros de materia alrededor de algunas protoestrellas. Las imágenes de alta resolución del objeto de Herbig-Haro HH-30 muestran con claridad que en algunos casos la estructura de dichos chorros no es perfectamente continua, sino más bien fragmentaria, como si se tratase en realidad de una serie de chorros separados de la estrella en rápida sucesión, como ráfagas de ametralladora. Según algunos astrónomos, la fragmentación de los chorros podría deberse a la interacción dinámica con el medio interestelar. En realidad, este efecto sería el resultado de emisiones periódicas de materia en los primeros estadios evolutivos de la estrella, que se repetirían a intervalos de tiempo de unos 20-30 años. La estructura fragmentaria de los chorros observada en algunos objetos de Herbig-Haro sugiere la presencia de fenómenos episódicos y podría indicar, por tanto, que la acreción de la materia sobre la protoestrella no se ha producido de manera perfectamente regular sino en etapas sucesivas. Por ello, dichos chorros representan un registro

A la derecha, esta fotografía, tomada por un astrónomo aficionado, muestra un espectacular paisaje nocturno desde una alta montaña.

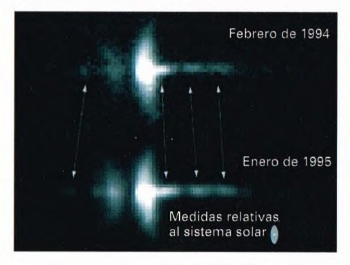
Abajo, en esta fotografía de una región del cielo situada en el interior de la nebulosa Trífida se observan zonas oscuras; es el polvo que cubre la luz.



EL ESPECTÁCULO DEL CIELO

Incluso la observación no profesional del cielo con un pequeño telescopio acoplado a una máquina fotográfica permite poner de manifiesto grandes y complejas estructuras gaseosas en el fondo celeste.





Arriba, sugestiva imagen de un detalle de M8, la nebulosa Laguna, en la constelación de Sagitario, que contiene muchos astros de reciente formación.

A la derecha, imágenes del objeto de Herbig-Haro HH30 tomadas con el telescopio espacial Hubble. La protoestrella se encuentra a una distancia de 450 años luz, en la constelación de Tauro. Comparando las imágenes tomadas con una diferencia de 11 meses se pone de manifiesto el movimiento de algunas aglomeraciones de materia (indicadas por flechas) a lo largo de la dirección principal del chorro, a una velocidad de 750.000 km/h. La imagen muestra con claridad las superficies superior e inferior del disco de acreción (visto de perfil), cuyas dimensiones son comparables a las de nuestro sistema solar. Como se puede observar, la estructura del disco es más gruesa a mayor distancia de su centro de simetría. El disco brilla porque está iluminado con la luz reflejada por la protoestrella, ocultada a su vez por el disco.

de lo que sucede durante los primeros instantes de vida de las estrellas; el estudio de su estructura, así como el de su tamaño, puede suministrar informaciones valiosísimas sobre las primeras etapas de formación estelar. En algunos casos, las observaciones realizadas con el telescopio Hubble han permitido seguir también a lo largo del tiempo el movimiento de estos agregados de materia y determinar la velocidad de expansión (del orden de unos 750.000 km/h). En algunos casos, además, los chorros parecen desplegarse alrededor de la dirección principal del movimiento, lo que sugiere que la emisión de gas no siempre se ha producido de manera regular o se ha originado en la misma región del disco circumestelar. La forma de los chorros puede también quedar deformada por la presencia de una o más compañeras invisibles, unas protoestrellas que no han logrado acumular materia suficiente como para llegar a la ignición, o sistemas planetarios en formación. La formación de sistemas planetarios sería un subproducto del nacimiento de la estrella. Los sistemas planetarios se formarían por fragmentación del disco de acreción circumestelar y una subsiguiente condensación de grumos de materia. Esto es lo que debió de ocurrir en nuestro sistema solar hace unos 4.500 millones de años, como lo demuestra el hecho de que los planetas orbitan alrededor del Sol en la misma dirección y en el mismo plano.

VIRGO

Virgo es una de las constelaciones del zodíaco visibles en los meses de abril y mayo. La constelación contiene un rico cúmulo de galaxias.



Según una antigua tradición, la Virgen (Virgo) representa a Ceres, la diosa romana de las cosechas. Esta diosa lleva en la mano una espiga, representada por la estrella más luminosa de la constelación, *Spica*. También es una de las pocas figuras humanas de todo el zodíaco.

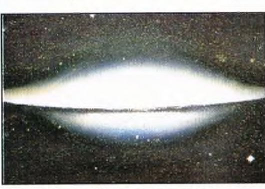
CÓMO LOCALIZAR LA CONSTELACIÓN

Virgo es fácilmente identificable una vez hallada la de Leo, ya que se encuentra al sureste de ésta. *Spica* está a mitad de camino entre Régulo, en Leo, y Antares, en Escorpión, cerca de la eclíptica.

ESTRELLAS PRINCIPALES

Alfa, o *Spica* (magnitud 1), la espiga de trigo, es una estrella blanca formada en realidad por un par de estrellas. Las dos componentes están tan próximas que ningún telescopio consigue separarlas; sin embargo, dado que el plano de sus órbitas está poco inclinado respecto a la línea visual, estas estrellas se ocultan periódicamente, pasando la una delante de la otra, lo que provoca que la luminosidad de *Spica* varíe en una décima de magnitud con un período regular de unos 4 días.

Gamma, llamada también Porrima (magnitud 3,5), es una estrella doble cuyas componentes tardan unos 170 años en completar una vuelta la una alrededor de la otra. Cuando están a la máxima distancia, las estrellas son separables incluso por telescopios modestos, pero cuando el movimiento orbital las lleva al punto de máxima proximidad, sólo los telescopios profesionales permiten resolverlas, ya que se encuentran a 0,3 segundos. Las dos estrellas tienen también otra peculiaridad: por su tamaño y color, son prácticamente idénticas; al estar situadas a 32 años luz de nosotros, que es la distancia a la que se consideran situadas todas las estrellas para establecer su magnitud absoluta, tienen una luminosidad aparente que iguala la absoluta.



Arriba, la fotografía muestra la galaxia del Sombrero, en la constelación de Virgo.

EL CÚMULO DE GALAXIAS

Virgo contiene un cúmulo formado por miles de galaxias que distan de nosotros decenas de millones de años luz. Este grupo de galaxias contiene numerosos objetos del catálogo de Messier: M49, M58, M59, M60, M61, M84, M86, M87, M89, M90, M104.

Con telescopios de aficionados, estas galaxias se ven como estrellas desenfocadas con magnitudes que varían entre la novena y la undécima, pero hay dos que merecen una mención especial: M87 y M104.

La primera es la «monstruosa» galaxia elíptica gigante que domina el grupo. Parece que en su centro hay un enorme agujero negro que aspira materia del resto de la galaxia, generando al mismo tiempo un velocísimo chorro de ésta. Recientes imágenes tomadas por el telescopio espacial Hubble muestran en detalle el chorro que parte del núcleo de M87. Esta galaxia también es una potente fuente de rayos X y ondas radioeléctricas.

M104 es la célebre galaxia del Sombrero, así llamada por su forma, una espiral similar a la nuestra o a la galaxia de Andrómeda.

OTROS OBJETOS

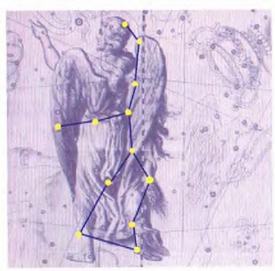
3C 273 es un cuásar, una galaxia lejanísima que posee un núcleo tan concentrado que parece una estrella y supera en luminosidad al resto del objeto. Se trata del cuásar más luminoso de todo el cielo y es observable con telescopios de 15 cm de apertura. Dista de nosotros unos 3.000 millones de años luz y al telescopio se muestra como una pequeña estrella azulada de magnitud 12,8. En él se produce un intenso chorro de materia, probablemente generado por un agujero negro que hay en su interior.



LOS MITOS Y LAS ESTRELLAS

VIRGO (LA VIRGEN)

La Virgen está asociada a distintas divinidades mitológicas y aparece en muchas leyendas. Según una de ellas, se trata de Astrea, diosa de la justicia, hija de Júpiter y Temis. Durante el paso de la edad de oro (período en que los hombres y los dioses vivían en perfecta armonía bajo el dominio de Cronos) a la edad de plata, en la cual el poder pasó a Júpiter y empezaron los conflictos entre los humanos y las divinidades del Olimpo, Astrea se propuso convencer a los hombres de que no abandonaran el camino de la concordia que hasta entonces habían seguido. Entristecida por la degeneración de las relaciones humanas, Astrea se retiró a una montaña. Cuando llegó la edad del bronce y del hierro y la violencia del género humano estalló, Astrea escapó al cielo, donde permanece en forma de constelación.

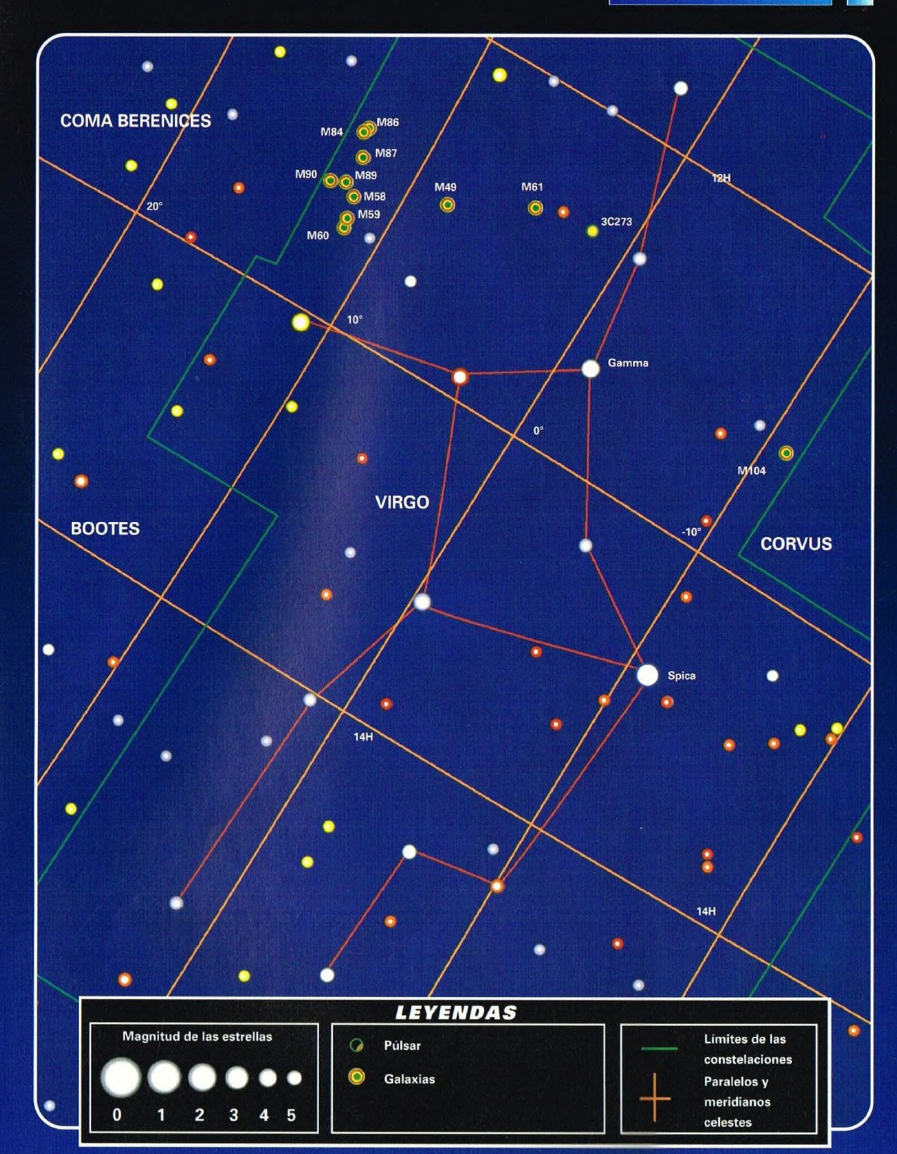


Arriba, la Virgen del zodíaco representada como Ceres, la mítica diosa de las cosechas, con una espiga en la mano.

DÓNDE BUSCARLA

VIRGO

La constelación de Virgo abarca una región del cielo comprendida entre 22° S y 15° N de declinación, y entre 11 horas 35 minutos y 15 horas 10 minutos de ascensión recta. No es íntegramente observable todo el año desde ningún lugar de la Tierra. Es íntegramente observable parte del año desde las latitudes situadas entre 75° S y 68° N. Nunca es plenamente visible desde latitudes más al norte de 68° N y más al sur de 75° S.


COMA BERENICES
M84
M86
M87
M90
M89
M58
M59
M60
M49
M61
3C273
12H
20°
10°
Gamma
0°
M104
VIRGO
BOOTES
-10°
CORVUS
Spica
14H
14H
LEYENDAS
Magnitud de las estrellas
0 1 2 3 4 5
Púlsar
Galaxias
Límites de las constelaciones
Paralelos y meridianos celestes

LA EMISIÓN INFRARROJA

Como es bien sabido, un cuerpo calentado emite luz y se vuelve incandescente. Menos intuitivo es el hecho de que cualquier cuerpo puede emitir radiaciones infrarrojas. Los procesos que gobiernan esta emisión son complicados.



La luz que perciben nuestros ojos constituye únicamente una modesta porción de todo el espectro electromagnético. Éste se extiende más allá de las radiaciones invisibles hacia el ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma en la parte de las altas frecuencias, y hacia el infrarrojo y la ondas de radio en la parte de las bajas frecuencias.

Todas estas radiaciones son totalmente invisibles para nosotros, pero los rayos infrarrojos pueden ser detectados como rayos térmicos.

Abajo, el Sol es la mayor fuente infrarroja disponible para la Tierra; los rayos infrarrojos que nos llegan a través del espacio interplanetario calientan ininterrumpidamente nuestro planeta.



LA LUZ EMITIDA POR LOS CUERPOS CALIENTES

Supongamos que entramos en una fundición y asistimos a la fabricación del acero: veremos que el metal fundido a altísima temperatura emite una luz blancoamarillenta que tenderá a volverse cada vez más roja a medida que se va enfriando y va sufriendo el proceso de solidificación. Al bajar la temperatura, se reduce también la emisión de luz por parte del metal; tanto, que al llegar a un cierto punto el objeto se «apaga»: el acero, pese a seguir estando muy caliente, ya no emite luz.

Si observamos todo esto en una estancia sin iluminación veremos que, mientras dura la incandescencia, el acero suministra la luz necesaria para alumbrar, en parte al menos, el ambiente en el que nos encontramos. Después, caeremos en la más completa oscuridad. No obstante, todavía podremos darnos cuenta de que a poca distancia de nosotros se encuentra un objeto caliente, porque percibiremos el calor que emite el acero y que llega hasta nosotros.

Un cuerpo caliente, pero no lo suficiente para estar incandescente, emite unos rayos caloríficos, los rayos infrarrojos, que nuestra piel puede detectar.

En realidad, bastan temperaturas mucho más bajas que las que reinan en una fundición para que se emitan rayos infrarrojos, porque la emisión infrarroja se produce al mismo tiempo que perdura la emisión óptica. En general, un cuerpo cualquiera a temperatura ambiente emite una gran cantidad de radiación infrarroja. Por ello, no es de extrañar que también el cuerpo humano y los objetos celestes, como las estrellas y las nebulosas, emitan rayos infrarrojos. El calor que nos llega del Sol está compuesto por este tipo de radiación, como también lo está el que nos llega de las brasas de la chimenea: si nos tapamos la cara con la mano podremos sentir inmediatamente una reducción de la temperatura debida a que los rayos infrarrojos, bloqueados por la mano, ya no pueden llegar al rostro; al mismo tiempo, la mano empezará a calentarse.

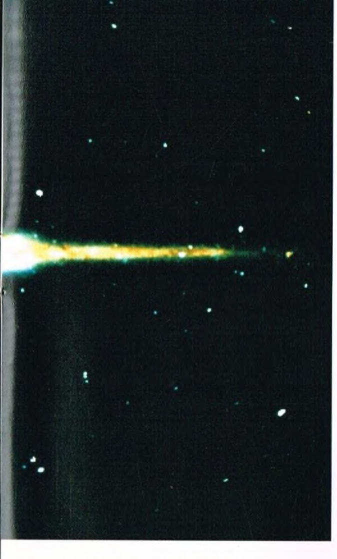


Esta imagen de la NASA muestra el plano de la Vía Láctea tomado por el satélite COBE en el marco del Infrared Background Experiment (DIRBE).

LOS MOVIMIENTOS AL MICROSCOPIO

¿Cuáles son los mecanismos responsables de la emisión infrarroja? Para comprender cómo funciona este tipo de radiación deberemos analizar qué sucede en los elementos fundamentales de la materia: los átomos y las moléculas.

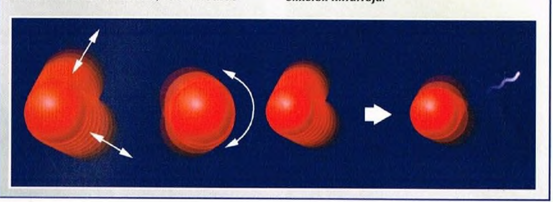
Si, con un microscopio potentísimo, pudiéramos observar las partículas microscópicas de las que estamos formados,



VIBRACIÓN MOLECULAR

En una molécula o en un sólido cristalino, los átomos o iones son obligados por fuerzas eléctricas a permanecer en posiciones fijas. En un líquido o un gas, en cambio, los enlaces son más lábiles, por lo que las partículas pueden fluir más o menos libremente. En realidad, los vínculos de los sólidos no son rígidos, sino que dejan una cierta libertad: a temperaturas superiores al cero absoluto, los átomos y los iones están agitados por continuos movimientos de vibración.

Abajo, en el dibujo se representan varios tipos de vibraciones moleculares que producen emisión infrarroja.



veríamos que están agitadas por movimientos frenéticos.

Estos movimientos pueden ser de dos tipos: de rotación y de vibración.

El primer movimiento, el de rotación, se produce cuando una molécula gira en el espacio; sólo pueden presentar rotación las moléculas de los gases y los líquidos, que, a diferencia de las de los sólidos, tienen libertad para moverse sin estar ligadas a posiciones fijas.

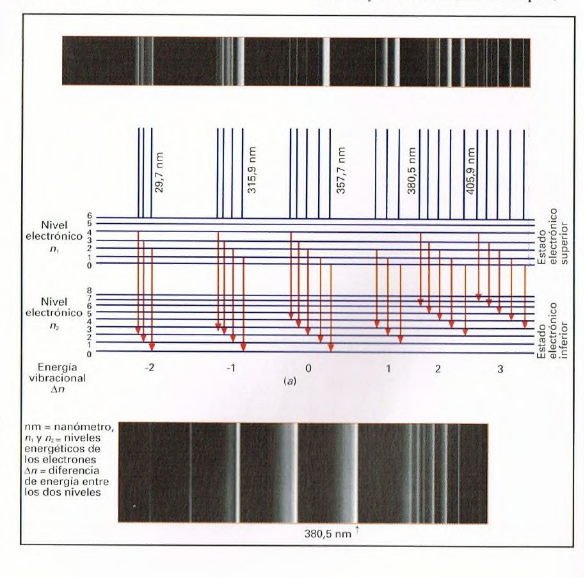
El segundo movimiento, el de vibración, lo generan pequeñas oscilaciones de los átomos alrededor de posiciones fijas. Por ejemplo, la molécula de agua está formada por un átomo de oxígeno unido a dos de hidrógeno que forman entre sí un ángulo de unos 120°. Los átomos de hidrógeno pueden variar su ángulo de posición oscilando alrededor de la posición de equilibrio; también pueden acercarse o alejarse un poco del átomo de oxígeno. Como en la molécula los tres átomos se mantienen juntos gracias a las fuerzas eléctricas, que actúan como muelles, dichos átomos sólo pueden alejarse realizando pequeñas oscilaciones, que constituyen el modo de vibración del que hemos hablado. En los sólidos cristalinos los átomos o iones están obligados a ocupar posiciones fijas y constituyen redes regulares. No obstante, podemos imaginar que están ligados entre sí a través de unos muelles, las fuerzas eléctricas de atracción, que les permiten una cierta libertad de movimiento en forma de vibraciones.

PÉRDIDAS DE ENERGÍA

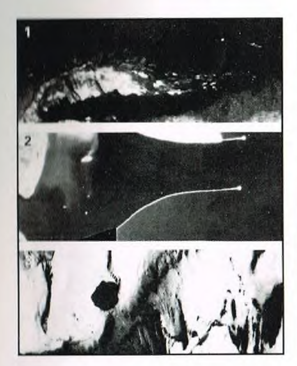
¿Por qué estos movimientos son tan importantes para la emisión infrarroja?

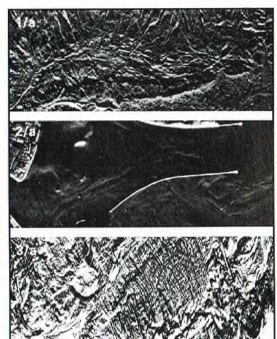
Un cuerpo, en virtud de su movimiento o de su posición en un campo de fuerzas, posee una cierta cantidad de energía. Esta energía puede cederse de varias maneras.

El modo más simple mediante el cual un cuerpo cualquiera, macroscópico como un asteroide y un automóvil, o microscópico,



En el espectro se ven algunas bandas debidas a la emisión de fotones en fenómenos de disociación de la molécula de nitrógeno. A cada banda le corresponde un «salto» electrónico, pero junto a estos saltos se producen también variaciones de los estados de vibración y rotación de las moléculas, que a su vez producen rayas tan próximas que parecen bandas.





A la izquierda, la secuencia de imágenes 1, 2 y 3 muestra la termografía aérea de una zona montañosa (1), de la desembocadura de un canal (2) y de un glaciar (3). Las imágenes 1/a, 2/a y 3/a son fruto de una elaboración de las anteriores, llamada análisis de frecuencia, que sirve para identificar las discontinuidades térmicas producidas por la textura de las superficies.

como un átomo o una molécula, puede perder parte de su energía consiste en chocar contra un segundo cuerpo y modificar su movimiento. Este proceso, que en física atómica y molecular se llama desexcitación por choque (o excitación, si se gana energía), es muy frecuente en objetos densos como el cuerpo humano o también más enrarecidos, como los gases; el número de colisiones por segundo de una molécula presente en el aire con otras moléculas es elevadísimo y crece con la temperatura.

También se produce una pérdida de energía a través de la emisión de uno o más fotones: este proceso recibe el nombre de desexcitación espontánea radiativa porque hay una producción de radiación. En los cuerpos a temperaturas de menos de un millar de grados absolutos, esta radiación consiste sobre todo en rayos infrarrojos.

En general, los dos procesos se presentan a la vez. El fenómeno se complica por el hecho de que una molécula puede perder energía a causa del efecto simultáneo de ambos procesos. No obstante, mientras que el proceso de desexcitación por choque se resuelve en una simple redistribución de energía entre las partículas que constituyen el cuerpo, el segundo proceso hace que escape parte de la energía térmica del cuerpo, la cual puede detectarse.

Si estudiamos la emisión con un analizador (un espectrógrafo de infrarrojos), veremos que las frecuencias emitidas forman un continuo al que se superpone una serie de bandas.

El origen de las bandas reside en la pérdida de energía rotacional y vibracional.

LOS SALTOS DE LOS ELECTRONES

Hay también otro tipo de emisión de radiación, que no se debe a la cesión de energía de rotación y vibración: la desexcitación electrónica.

En un átomo o una molécula los electrones no pueden disponerse de cualquier manera. Su distribución corresponde a valores bien determinados de la energía. Normalmente, los electrones se encuentran en condiciones que confieren al átomo o a la molécula la mínima energía posible. Se dice en tal caso que el sistema se encuentra en el estado fundamental.

Pero puede suceder también que, a resultas de un choque con otro átomo u otra molécula, los electrones reciban una cantidad de energía suficiente para alcanzar un estado de mayor energía: se habla entonces de estado excitado. Este estado es anómalo para las moléculas y por ello el sistema tiende espontáneamente a regresar al estado fundamental. Para hacerlo debe ceder la energía que ha recibido del choque. Una vez más, hay dos modos de deshacerse de este exceso: transfiriendo la energía a otra molécula mediante un choque o emitiendo uno o más fotones. En correspondencia, con un salto electrónico varían también los estados de rotación y de vibración, por lo cual los fotones emitidos no tienen la energía que corresponde a la caída del electrón hacia los niveles inferiores sino una energía que tiene en cuenta también el hecho de que la rotación o la vibración (o ambas) se han modificado. Contrariamente a lo que sucede en un átomo simple, donde el espectro muestra rayas simples bien delimitadas, en las moléculas se observan espectros cuyas rayas se ensanchan en forma de bandas, constituidas por todas las variaciones de los movimientos de vibración y rotación que pueden verificarse en concomitancia con un salto electrónico.

ROTACIÓN MOLECULAR

A resultas de un choque, una molécula puede empezar a girar sobre sí misma. No obstante, el estado de rotación es anómalo, pues la molécula tiende a regresar a una situación de equilibrio, emitiendo radiación. Cuando las energías en juego son bajas, esta radiación corresponde a los rayos infrarrojos.



Arriba, lo mismo que las vibraciones, las rotaciones de las moléculas alrededor de un eje producen la emisión de rayos infrarrojos.



A la derecha, antes de la aparición de los intensificadores de imágenes, las lentes de visión nocturna aprovechaban la emisión de los cuerpos calientes, como el organismo humano, para ver en la oscuridad de la noche.



Arquímedes, en Siracusa, sacó partido de los rayos infrarrojos para luchar contra los romanos que asediaban la ciudad, concentrando sobre la flota adversaria las radiaciones del Sol.

Por tanto, observando las moléculas podemos verificar cuanto hemos dicho acerca de las rotaciones y las vibraciones. Si los saltos electrónicos se producen entre estados de energía próxima, la emisión de los fotones tiene lugar en el infrarrojo, siempre con la producción de bandas.

EMISIÓN DEL CUERPO NEGRO

Por tanto, el movimiento microscópico de los constituyentes fundamentales de la materia y las desexcitaciones electrónicas pueden aducirse para explicar la presencia de zonas de mayor intensidad en el espectro emitido por un cuerpo caliente. ¿Cómo explicar el fondo continuo? Mediante un concepto completamente nuevo, el de cuerpo negro.

Piénsese en un cuerpo calentado como si fuera una cavidad recorrida incesantemente por ondas electromagnéticas. Estas ondas son asimilables a las que se generan en una cuerda con los extremos fijos. Son ondas estacionarias, pues no se propagan por el interior de la cuerda sino que representan oscilaciones de la misma, como las que se pueden ver en las cuerdas de una guitarra. Por añadidura, en una cuerda con los extremos fijos no pueden generarse ondas estacionarias con longitudes de onda que no sean submúltiplos de las dimensiones de la cavidad; las únicas longitudes de onda posibles son la longitud de la cuerda misma, la mitad de ella, la tercera parte, etc. Ahora bien, si el cuerpo tiene una cierta temperatura, sólo algunos tipos de ondas, de todas las posibles, pueden ser excitadas. El número de modos de vibración puestos en movimiento aumentará con la temperatura.

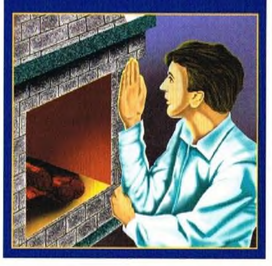
Cuando la temperatura es lo bastante baja, la mayor parte de los modos de vibración de las ondas electromagnéticas corresponden a las longitudes de onda infrarrojas.

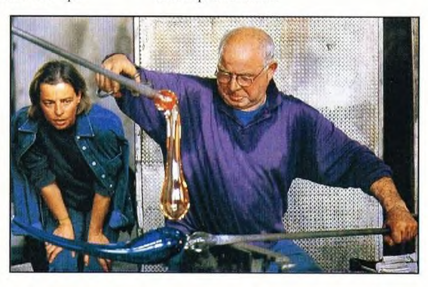
Naturalmente, los cuerpos no son cavidades; además, estas ondas electromagnéticas salen del cuerpo, por lo que las anteriores consideraciones sólo valen a grandes rasgos. El concepto fundamental es que la temperatura del cuerpo permite generar ondas electromagnéticas cuya longitud de onda e intensidad dependen de la propia temperatura: cuanto más caliente está un cuerpo, más corta será la longitud de onda de las ondas electromagnéticas emitidas y mayor será la intensidad. Este tipo de emisión se añade al de bandas causado por la desexcitación rotacional, vibracional y electrónica, pero en realidad es el principal mecanismo responsable de la emisión infrarroja de las estrellas y las nebulosas, así como del cuerpo humano o de un pedazo de acero calentado. Observando con una telecámara de rayos infrarrojos podremos averiguar cuál es el estado térmico de los objetos que estamos mirando: los que aparezcan más luminosos serán los más calientes, mientras que los más fríos tendrán una emisión menos pronunciada.



PROBAR LA EXISTENCIA DE LOS RAYOS INFRARROJOS

Se puede probar fácilmente la existencia de los rayos infrarrojos con una chimenea con brasas, pero sin llamas: el calor que procede de las brasas y que, en ausencia de obstáculos, llega a nuestro rostro es interceptado por la mano con que nos resguardamos los ojos. Existe pues una radiación que, al igual que la luz, se propaga en línea recta y transporta calor: son los rayos infrarrojos.





A la derecha, el vidrio se trabaja a unas temperaturas, de varios cientos de grados, a las cuales esta sustancia se encuentra en estado pastoso. En tales condiciones, el vidrio no se puede tocar con las manos; la emisión de rayos infrarrojos impide incluso la mera aproximación.

EL CIELO FRÍO DE LA ASTRONOMÍA INFRARROJA

A la longitud de onda de las radiaciones infrarrojas, el cielo es muy distinto del que se observa con telescopios normales. Está poblado por estrellas frías, polvo y tal vez planetas de otras estrellas.



Durante largo tiempo, la astronomía, se ha desarrollado sin ayuda de instrumentos. Los astrónomos de la Antigüedad disponían sólo de su agudeza visual y de una infinita paciencia para tratar de robar sus secretos al cielo. Desde comienzos del siglo XVII, con la invención del telescopio, esta situación se modificó radicalmente y se abrieron nuevos horizontes celestes ante las lentes y los espejos de los astrónomos. Esta revolución duró unos tres siglos hasta que, a fines del siglo XIX, entraron en liza nuevos instrumentos, como el espectroscopio, con el cual se inauguró una nueva ciencia: la astrofísica.

En los últimos decenios se ha asistido a nuevas y continuas revoluciones así como al nacimiento de diferentes astronomías, ya que se ha empezado a explorar el cielo a longitudes de onda distintas de la visible. La primera de estas nuevas astronomías fue, en los años treinta, la radioastronomía; inmediatamente después de la segunda guerra mundial, se empezó a hablar de astronomía infrarroja. Los detectores de infrarrojos habían sido construidos en los años de la guerra precisamente por motivos bélicos; unos años después del término del conflicto, cuando estos descubrimientos fueron sustraídos al secreto militar, los astrónomos se los apropiaron y empezaron a observar el cielo en estas regiones del espectro electromagnético.

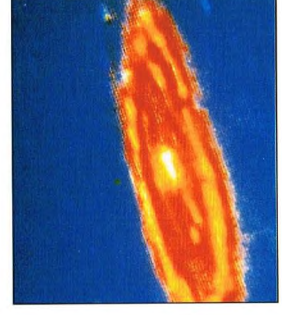
Los objetos típicos de la astronomía infrarroja son los cuerpos fríos. Las estrellas normales, por ejemplo, emiten la mayor parte de su energía a las longitudes de onda

DATOS

IRAS (INFRA-RED ASTRONOMICAL SATELLITE)

Proyecto: Holanda, Gran Bretaña y EE UU
Diámetro del espejo primario: 60 cm
Dimensiones: longitud: 3,60 m; anchura: 3,24 m; altura: 2,05 m (con los paneles solares desplegados)
Peso: 809 kg
Órbita: 900 km de altitud, inclinada 99° respecto al ecuador terrestre
Temperatura del satélite: plano focal a 3 K; las demás partes a no más de 15 K
Fecha de lanzamiento: 26 de enero de 1983
Fin de la misión: 22 de noviembre de 1983





Arriba, representación pictórica del satélite IRAS en órbita alrededor de la Tierra. A la derecha, imagen de infrarrojos de la galaxia de Andrómeda, M31, tomada por el IRAS.

de la luz visible. Los cuerpos más fríos, como los planetas y las nubes de polvo, en cambio, emiten principalmente en el infrarrojo.

INFRARROJOS Y ATMÓSFERA

La radiación infrarroja es muy importante porque en gran medida es responsable del transporte del calor; buena parte de la radiación que recibimos de nuestro Sol y que nos calienta es precisamente radiación infrarroja.

La radiación infrarroja, como todas las radiaciones electromagnéticas, puede atravesar el espacio vacío y llegar, partiendo de las fuentes celestes, hasta las cercanías de nuestro planeta. Pero la atmósfera terrestre la bloquea, pues algunos gases que componen aquélla (como el vapor de agua, el dióxido de carbono, el oxígeno y el monóxido de carbono) tienen la propiedad de absorberla en su mayor parte, dejando pasar sólo una fracción concentrada en pequeñas «ventanas» de longitud de onda. Para poder efectuar observaciones en el infrarrojo desde la superficie terrestre es necesario poner los telescopios a gran altitud a fin de minimizar la absorción atmosférica; es el caso, por ejemplo, del observatorio situado en el Gornergrat, en Suiza, a 3.100 m de altura. En la práctica, la mayoría de las observaciones infrarrojas se llevan a cabo actualmente desde el espacio, por medio de telescopios puestos en órbita a tal efecto.

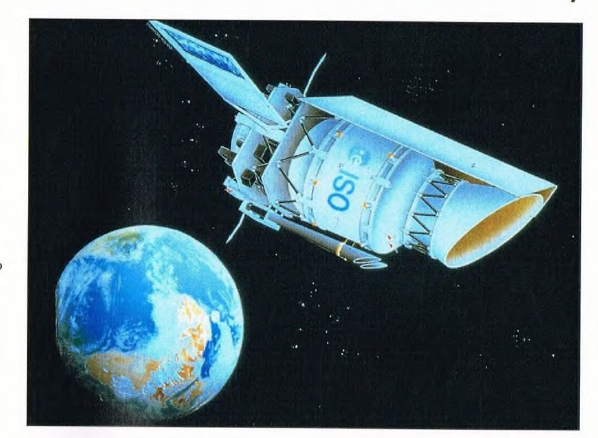
ENORMES TERMOS

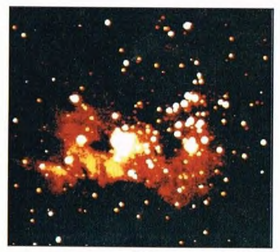
La característica esencial de los satélites de observación infrarroja es que deben enfriarse hasta temperaturas bajísimas. En efecto, cualquier objeto (el cuerpo humano, la Tierra, un mueble de nuestra casa) emite en el infrarrojo, por la simple razón de tener una temperatura superior al cero absoluto, con una intensidad que crece rápidamente con la temperatura. En particular, los satélites utilizados para las medidas emiten radiación infrarroja; para minimizar el efecto de eventuales señales espúreas, deben enfriarse todo lo posible. Para ello se utiliza generalmente helio líquido, que permite obtener temperaturas de pocos grados por encima del cero absoluto; la cantidad de refrigerante que el satélite es capaz de transportar determina la duración de su vida operativa. Cuando el refrigerante se acaba, la misión concluye; esto hace que los satélites de astronomía infrarroja sean en realidad unos grandes termos llenos de helio líquido.

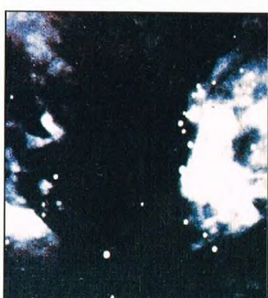
DATOS

ISO (INFRARED SPACE OBSERVATORY)

Proyecto: ESA (Agencia Espacial Europea)
Diámetro del espejo: 60 cm
Dimensiones: altura: 5,3 m; diámetro: 2,3 m
Peso: 2.400 kg
Órbita: perigeo: 1.000 km; apogeo: 70.000 km; 5° de inclinación sobre el ecuador; órbita de 24 horas
Fecha de lanzamiento: 17 de noviembre de 1995
Vida operativa prevista: 20 meses
Temperatura del satélite: 10 K para el sistema óptico; 3 K para el plano focal; 1,6 K para los detectores





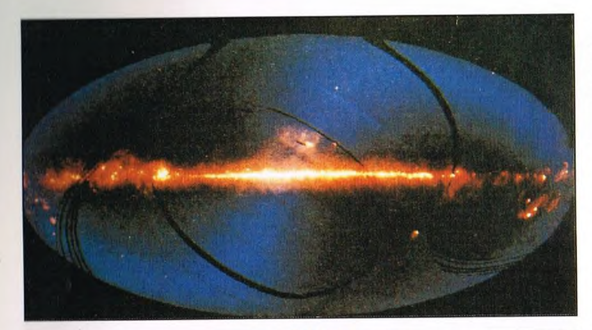


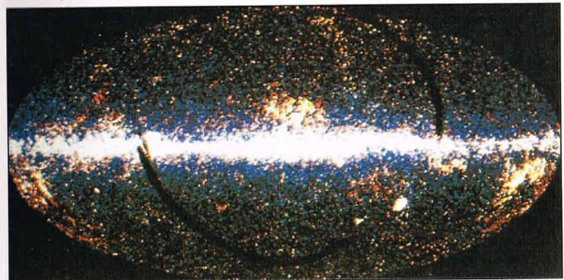
Arriba, el observatorio espacial de infrarrojos ISO en una representación pictórica mientras orbita cerca de la Tierra.
A la derecha, región de formación estelar en la nebulosa NGC 2024.
Abajo, la misma región observada ópticamente.

LA LARGA HISTORIA DEL IRAS

Entre los satélites de infrarrojos merece mención especial el IRAS (Infra-Red Astronomical Satellite). Este satélite fue lanzado en 1983 y en el curso de su vida operativa de unos 10 meses observó el 96% de la bóveda celeste, efectuando medidas en cuatro bandas de longitud de onda centradas en 12, 25, 60 y 100 micras (una micra = una millonésima de metro).

El IRAS era un instrumento destinado a realizar una inspección lo más completa posible del cielo; no contaba entre sus objetivos la observación detallada de objetos específicos. Este satélite logró elaborar un mastodóntico catálogo de unas 250.000 fuentes puntiformes (sobre todo estrellas) y otro de 20.000 fuentes extensas (nubes de gas, galaxias, etc.). Se considera que la misma tarea, desde la Tierra, con las escasas longitudes de onda accesibles,

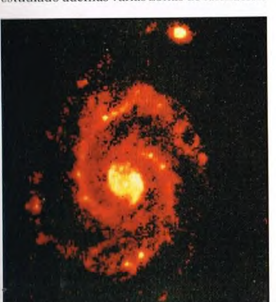




A la izquierda, el cielo que observa el IRAS proyectado en coordenadas galácticas. La banda luminosa central es la Vía Láctea.
Abajo, la misma proyección pone de manifiesto la distribución de fuentes puntiformes descubiertas por el satélite.

habría requerido cien mil años de trabajo con un telescopio de 5 metros.

Entre los innumerables descubrimientos efectuados, hay que mencionar discos de materia alrededor de ciertas estrellas como Vega (en los cuales tal vez se están formando planetas), anillos de polvo en nuestro sistema solar y unas nubes de polvo en la Vía Láctea llamadas cirros infrarrojos. El IRAS ha estudiado además varias zonas de formación estelar, descubriendo que la formación de estrellas similares al Sol en nuestra Galaxia es mucho más frecuente de lo que se pensaba. Por último, ha observado también cuerpos celestes muy lejanos, como cuásares y galaxias activas; ha visto extraños objetos 100 veces más luminosos en el infrarrojo que en el visible.



A la izquierda, una de las primeras imágenes tomadas por el satélite ISO ha sido la de la galaxia M51, en la que son perfectamente visibles los brazos espirales.

NUEVOS DESCUBRIMIENTOS CON EL ISO

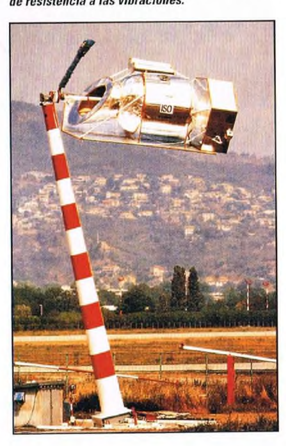
El ISO (Infrared Space Observatory), operativo en el mes de diciembre de 1995, fue sometido durante dos meses a distintas operaciones de calibrado y a las pruebas necesarias para verificar el correcto funcionamiento de los instrumentos. Los más de 2.000 l de helio superfluido que lleva a bordo le han permitido mantenerse operativo hasta mucho después del verano de 1997.

El telescopio infrarrojo del ISO tiene aproximadamente las mismas dimensiones que el del IRAS; unos detectores mucho más modernos permiten que este satélite realice unas prestaciones muy superiores a las de su predecesor. El ISO puede ver unos detalles mucho más finos y su sensibilidad supera la del IRAS en varios órdenes de magnitud.

El ISO, lanzado por medio de un Ariane 4, está diseñado como un auténtico observatorio orbital al cual pueden acceder los científicos de todo el mundo con distintas propuestas de observación. Los primeros resultados divulgados relativos al trabajo de este satélite consisten en la observación de galaxias en interacción, como NGC 4038-9 y NGC 6090; en ellas se ha descubierto que la formación de estrellas es entre 10 y 20 veces más activa que en nuestra propia Galaxia.

En el futuro, entre el 2002 y el 2003, está previsto el lanzamiento del FIRST, un satélite de la ESA con un telescopio infrarrojo de diámetro comprendido entre 4 y 8 m. Este satélite permitirá un gran avance del conocimiento en dicho campo, pues logrará observar objetos de las galaxias del Grupo Local con la misma precisión con la que el IRAS ha observado los objetos de nuestra Vía Láctea.

La estructura externa del satélite ISO sometida a una serie de pruebas; la de la fotografía es una de resistencia a las vibraciones.





EN EL PRÓXIMO NÚMERO

EL SISTEMA SOLAR

PLANETAS DE OTRAS ESTRELLAS

ESTRELLAS Y GALAXIAS

ATLAS ESTELARES Y CATÁLOGOS

GUÍA DE LAS CONSTELACIONES

JIRAFA

LA EXPLORACIÓN DEL ESPACIO

SETI

EL USO DEL ESPACIO

LA ESTACIÓN ESPACIAL MIR

EL UNIVERSO

ENCICLOPEDIA DE LA ASTRONOMÍA Y EL ESPACIO

21



PLANETA DeAGOSTINI



COMPOSICIÓN DE LA OBRA

Volumen 1	Fascículos 1	al	16
Volumen 2	Fascículos 17	al	32
Volumen 3	Fascículos 33	al	48
Volumen 4	Fascículos 49	al	64
Volumen 5	Fascículos 65	al	80

VENTA EN QUIOSCOS

Pida a su proveedor habitual que le reserve un ejemplar de EL UNIVERSO. Adquiriéndolo todas las semanas en el mismo punto de venta facilitará la distribución y obtendrá un mejor servicio.
Las tapas correspondientes a cada volumen se ponen a la venta con el fascículo que cierra el tomo. Con dicho fascículo se entregan las portadillas correspondientes.

Presidente: José Manuel Lara
Director General: Carlos Fernández
Director Editorial: Virgilio Ortega
Director General de Producción: Félix García
Coordinador General: Carles Dorico

© Editorial Planeta Argentina S.A.I.C.
Av. Independencia, 1668 - Capital Federal
Servicio de atención al cliente: Tel. (01) 482 - 0655 y 482 - 0657
Distribuye: Capital: Huesca-Sanabria,
Baigorri, 103, Capital Federal,
Interior: D.G.P., Alvarado, 2118, Capital Federal

© Editorial Planeta Mexicana, S.A. de C.V.
Av. Insurgentes Sur # 1162 - México D.F.
Servicio de atención al cliente: Tel. 575 13 48

© Editorial Planeta Colombiana, S.A.
Carrera, 68, n.º 25-55 - Santa Fé de Bogotá, D.C.
Servicio de atención al cliente: Tel. 9800 - 15315

© Editorial Planeta Chilena, S.A.I.C.
Olivares, 1229 - Santiago de Chile

ISBN Obra completa (con vídeo): 84-395-4148-1
Obra completa (sin vídeo): 84-395-4138-4
Fascículos (con vídeo): 84-395-4149-X
Fascículos (sin vídeo): 84-395-4139-2
Depósito legal: B-47.097-1997

Impresión: Cayfosa, Santa Perpètua de Mogoda, Barcelona
Impreso en España - Printed in Spain - Mayo 1998

Los editores se reservan el derecho de modificar el precio de venta de los componentes de la colección en el transcurso de la misma, si las circunstancias así lo exigieran.
Los editores garantizan la publicación de todos los fascículos que componen esta obra.

Fotografías: Lee Gibbons: cubierta, 116-117, 116ab., 117ar.; ESA/SPL: 107c.der.; E.T. Archive: 106ar.; Galaxy Picture Library: 101, 104, tercera de cubiertas; IGDA: 107ar.der.; Science Photo Library/Julian Baum: 106-107; Dr. Jeremy Burgess: 103 der.; Range: 111; Hugh Rowland: 110; Spectrum: 110, 111; US Naval Observatory: 112ar.izq.; Bristock-IFA: 114-115; BNSC/ESA: 118ab.; ESA: 118-119, 119ab., 120c.; Tony Stone Picture Library: 120ab.
Dibujos: Robin Carter/WLAA: 104-105, 117ab.; David A. Hardy: 102-103; Hugh Rowland: 105, 106ab., 120; Katz: 108-109; Sandra Russell/Black Hat: 112ar.; Julian Baum: 113; Farroxs: 116ar.; Robin Bottel: 115ab.; Spectrum Picture Library: 114ab.

PETICIÓN DE FASCÍCULOS ATRASADOS

Válido sólo para el territorio español y para no suscriptores.

Si desea recibir algún fascículo atrasado o tapas, rellene en LETRAS MAYÚSCULAS este boletín y envíelo a:
PLANETA-DeAGOSTINI, Apartado de Correos N.º 2.867 - 08080 Barcelona, o llame al Tel. **902 288 288***

DATOS PERSONALES:

APELLIDOS

NOMBRE

CALLE O PLAZA

N.º PISO PUERTA ESC.

CÓDIGO POSTAL POBLACIÓN

PROVINCIA EDAD

TELÉFONO PROFESIÓN

FIRMA (Imprescindible)

• Recibirá contrarreembolso, más gastos de envío todo el material que nos haya solicitado.

SOLICITUD:

EL UNIVERSO
ENCICLOPEDIA DE LA ASTRONOMÍA Y EL ESPACIO

Indique los números de los fascículos atrasados que desea recibir:

N.º de tapas que solicita: ____________

Indique si desea recibir la versión con vídeo o sin vídeo:

Con vídeo ☐ Sin vídeo ☐

• Planeta-DeAgostini mantendrá su servicio de petición de atrasados hasta un plazo máximo de 18 meses a partir de la fecha de venta de cada uno de los números que forman la colección.

PLANETAS DE OTRAS ESTRELLAS

Hasta hace muy poco tiempo no se conocía ningún planeta fuera del sistema solar. Pero hoy, gracias a instrumentos cada vez más sofisticados, empezamos a tener pruebas de que muchas otras estrellas están rodeadas de sistemas planetarios.



A simple vista, y en condiciones ideales de visibilidad, podemos ver unas 6.000 estrellas; con unos prismáticos o un pequeño telescopio, ya vemos más de las que se pueden contar. Y se trata sólo de las estrellas de nuestra Galaxia, la Vía Láctea. Se cree que en el universo hay aproximadamente cien mil millones de galaxias, cada una de ellas con unos cien mil millones de estrellas. Sin embargo, y a pesar de este desmesurado número de estrellas conocidas y observables, hasta hace un par de años no se tenía ningún indicio de la existencia de planetas, aparte de los nueve del sistema solar.

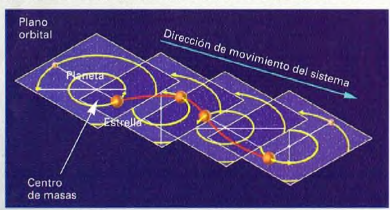
UNA INCREÍBLE DISCREPANCIA

¿Cómo se explica esta increíble diferencia entre el número de estrellas y de planetas conocidos? Esencialmente, existen dos motivos. El primero es que los planetas no emiten luz propia y sólo brillan gracias a la luz que reflejan procedente de las estrellas a cuyo alrededor orbitan. Por tanto, son objetos de luminosidad muy débil. Probablemente, este inconveniente podría superarse con cierta facilidad, al menos en el caso de los planetas no demasiado lejanos, utilizando los potentísimos telescopios de nueva tecnología, acoplados a detectores electrónicos muy sensibles. Pero hay un segundo motivo: la débil luz de los eventuales planetas, incluso de los relativamente cercanos, se perdería en la luz mucho más intensa de la estrella alrededor de la cual orbitan, lo cual haría que fuese imposible distinguirlos. Por ejemplo, un hipotético observador extraterrestre situado a una docena de años luz de la Tierra que observase el sistema

Unos hipotéticos habitantes de planetas extrasolares podrían habitar en paisajes muy distintos de los nuestros, tal como ha imaginado un artista en este dibujo.

LA ASTROMETRÍA

La astrometría permite ver si el movimiento de una estrella es rectilíneo, como debería ser, o no lo es. Si a su alrededor hay un planeta, éste «tira» de la estrella un poco a la derecha y un poco a la izquierda, haciéndole recorrer una trayectoria sinuosa. En la práctica, estas mediciones son muy difíciles. Piénsese que, observando el sistema solar desde una distancia aproximadamente de 30 años luz, se vería que Júpiter, el planeta con más masa, induciría en el Sol un desplazamiento de 0,5 milésimas de segundo de arco, y en la Tierra una de 0,3 millonésimas de segundo de arco.



Un sistema estrella-planeta que se mueve en el espacio. El movimiento de la estrella se ve perturbado por la presencia del planeta.

solar en busca de planetas dentro del sistema vería el mayor de ellos, Júpiter, unos mil millones de veces más débil que el Sol (esto significa que entre los dos cuerpos hay una diferencia de luminosidad de unas 22 magnitudes). Y no sólo esto: Júpiter aparecería separado del Sol con un ángulo de sólo un segundo de arco, prácticamente el ángulo bajo el cual se verían los bordes de una moneda de tamaño mediano a unos 6 km de distancia.

CÓMO BUSCARLOS

Los métodos para la búsqueda de planetas extrasolares se dividen básicamente en dos categorías: indirectos y directos. Los primeros son los que no permiten llegar a ver realmente el planeta, sino sólo deducir su presencia estudiando la estrella alrededor de la cual podría orbitar. Por tanto, las observaciones se dedican a las estrellas cercanas, cuya luz se analiza con diversas técnicas para descubrir eventuales anomalías indicadoras de la presencia de un cuerpo orbitante.

En cambio, los segundos (métodos directos) deberían permitir ver el planeta propiamente dicho. En este caso, se trata de intentos que hay que situar en el límite de lo posible y consisten en separar la luz del planeta de la de la estrella. Para ello, son muy útiles las mediciones efectuadas en las longitudes de onda del infrarrojo del espectro electromagnético. Los planetas son objetos fríos, mientras que las estrellas son muy calientes. Los objetos fríos emiten la mayor parte de su energía precisamente en el infrarrojo.

En consecuencia, en estas longitudes de onda, la diferencia de emisión entre la estrella y el planeta se reduce, lo que facilita las observaciones.

ASTROMETRÍA Y VELOCIDAD RADIAL

Los métodos indirectos clásicos son dos y se basan en mediciones de la posición o la velocidad de la estrella. Todas las estrellas se mueven sometidas a las fuerzas gravitatorias de otras o, sencillamente, porque orbitan alrededor del centro de la Galaxia. El movimiento de las estrellas relativamente próximas a nosotros es bastante evidente; en las más lejanas, en cambio, es prácticamente inobservable. En general, estos movimientos son regulares, es decir, se producen a lo largo de trayectorias aproximadamente rectilíneas (al menos a pequeñas escalas temporales) y a velocidades constantes.

Efectuando mediciones de astrometría, es decir, medidas de posición muy precisas de los astros, se observa una estrella durante un largo período de tiempo y se intenta descubrir si su movimiento es efectivamente rectilíneo y regular o parece un movimiento en zigzag. En este caso, un planeta podría ser el responsable de esta irregularidad.

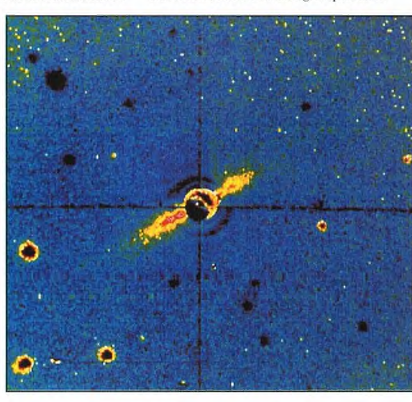
El otro método indirecto, mucho más aplicado que el anterior, se basa en el intento de medir la velocidad de desplazamiento de la estrella, o al menos el de la componente de esta velocidad en la dirección Tierra-estrella. La velocidad medida de esta manera se llama velocidad radial. Si el movimiento de la estrella observada no es perturbado por la presencia de uno o más planetas, su velocidad será uniforme. En cambio, si existiese algún cuerpo masivo en sus proximidades, como un planeta de tipo joviano, se podría establecer la hipótesis de que la velocidad de la estrella variaría ligeramente con un período igual al de la rotación del planeta que orbita a su alrededor; este planeta «tiraría» de ella hacia una parte y luego hacia otra, alterando su movimiento.

UN ERROR HISTÓRICO

Hace algunos años, unos científicos propusieron un nuevo método indirecto para la detección de planetas extrasolares. Se basaba en la observación de los púlsares, estrellas de neutrones muy densas y con una rapidísima rotación alrededor de un eje. En muchos casos, el período de esta rotación es medible y del orden de una centésima de segundo e incluso menos. No obstante, hoy se dispone de instrumentos muy precisos para la medida del tiempo, y estas observaciones no presentan grandes dificultades.

En 1991, un grupo de investigadores británicos publicó en la prestigiosa revista científica *Nature* los datos relativos al supuesto descubrimiento de un planeta alrededor del púlsar llamado PSR 1829-10, situado en la constelación del Escudo. Los científicos, midiendo con gran precisión

A la derecha, el disco de polvo de la estrella Beta* Pictoris *fue el primero que, en 1983, se identificó ópticamente. Está compuesto de polvo y gas, y tiene unas dimensiones muy superiores a las de nuestro sistema solar. Quizá en su interior se han formado (o se están formando) planetas.



su período de rotación, observaron que mostraba irregularidades constantes, las cuales imputaron a la presencia de un planeta. Pero poco después de un año, uno de los artífices del descubrimiento tuvo que admitir, en un congreso internacional, que este resultado estaba equivocado y que se debía a un error introducido en la medición del movimiento de la Tierra alrededor del Sol.

En la misma época, otro grupo, aplicando el mismo método (y corrigiendo el error de sus colegas), anunció el descubrimiento de un planeta alrededor del púlsar PSR 1257+12. Este descubrimiento no ha sido desmentido e incluso unos estudios más precisos han permitido pensar en la presencia de tres planetas. Pero, también en este caso, es de rigor la máxima prudencia, sobre todo considerando el hecho de que es muy difícil imaginar cómo se han podido formar planetas alrededor de estrellas como los púlsares, que, según se cree, son restos de la enorme explosión de una supernova.

LOS DISCOS CIRCUMESTELARES

Entre los métodos indirectos para la búsqueda de planetas fuera del sistema solar, hay que citar el trabajo del satélite IRAS (Infra-Red Astronomical Satellite), lanzado en 1983. Como su nombre indica, este satélite efectúa mediciones en el infrarrojo y, en unos 10 meses, cubrió con sus observaciones prácticamente toda la bóveda celeste. Uno de sus mayores descubrimientos fueron algunas estrellas que emiten mucha más radiación en el infrarrojo de lo que cabría esperar según las teorías. Este exceso de infrarrojos fue interpretado inmediatamente por los astrónomos como resultado de la presencia de materia fría (polvo y gas) que forma discos o cubiertas alrededor de estas estrellas. Poco tiempo después, dos astrónomos estadounidenses, Smith y Terrile, lograron ver el disco que hay alrededor de la estrella Beta *Pictoris* utilizando un telescopio que permitía ocultar la luz de la estrella central.

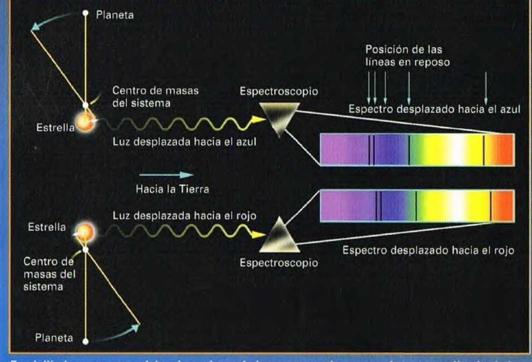
Evidentemente, de esta manera no es posible ver los planetas, pero se puede observar que hay muchas estrellas que tienen discos de polvo muy similares al que se piensa que fue el origen de los planetas del sistema solar. En los últimos años, el Hubble ha logrado observar muchos discos de polvo de esta clase en la región de la nebulosa de Orión, discos a los que se ha dado el nombre de *proplyd*, es decir, *proto-planetary disk* (disco protoplanetario).

51 PEGASI

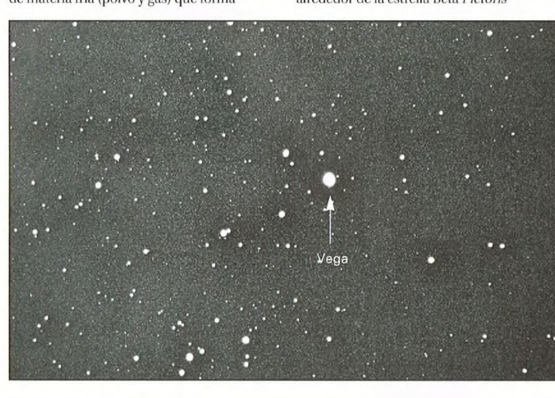
En los años más recientes, se ha producido una verdadera explosión de descubrimientos en este campo. A finales

VARIACIÓN DE LAS VELOCIDÀDES RADIALES

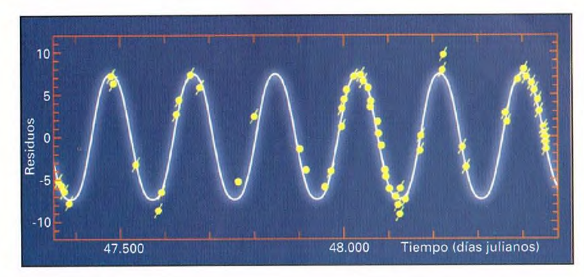
También la velocidad a la que una estrella se mueve en el espacio está influida por la presencia de un eventual planeta. En este caso, vemos que las rayas espectrales de la estrella se desplazan periódicamente a veces hacia el rojo (cuando el planeta ejerce una atracción en dirección opuesta a la Tierra), a veces hacia el azul (cuando la atracción es hacia nosotros). Sin embargo, también en este caso las mediciones son dificilísimas. Si el sistema solar se observase desde una distancia de unos 30 años luz, se vería que Júpiter modifica la velocidad del Sol en 13 m/s, y la de la Tierra en 0,09 m/s, prácticamente la velocidad de una hormiga.



En el dibujo se muestra el desplazamiento de las rayas en el espectro de una estrella alrededor de la cual orbita un planeta masivo.



A la izquierda, Vega, en la constelación de la Lira, es una de las estrellas más luminosas del cielo estival. Fue la primera estrella en la que el satélite IRAS midió una cantidad anómala de energía emitida en el infrarrojo. Este exceso en el infrarrojo se interpretó como un efecto de la presencia de un disco protoplanetario de polvo y gas alrededor de la estrella.



En el gráfico pueden observarse los residuos de la señal del púlsar PSR 1829-10. El período es de 184,4 días.



Fotografía de la estrella 51 **Pegasi** *tomada con un gran telescopio. Se trata de un astro similar al Sol, alrededor del cual orbitaría un planeta.*

de 1995, dos astrónomos suizos, que trabajan en el observatorio de Ginebra, anunciaron el descubrimiento de un planeta alrededor de la estrella 51 *Pegasi*. El método utilizado fue el de medición de la velocidad radial y, para ponerlo en práctica, desarrollaron un espectrógrafo muy sensible, capaz de medir variaciones de velocidad de 12 metros por segundo.

51 *Pegasi*, que es una estrella del tipo espectral G2 (y, por tanto, totalmente similar al Sol) presenta unas oscilaciones de su velocidad radial de casi 50 m/s, un dato que, por su magnitud, atenúa el riesgo del error instrumental. Estas oscilaciones se pueden atribuir a la presencia de un planeta de una masa al menos doble que la de Júpiter, que orbita alrededor de la estrella en un período de poco más de cuatro días. De acuerdo con las leyes de Kepler, este último dato sitúa el planeta a una distancia de tan sólo 7 millones de km de la estrella, es decir, ocho veces más cerca de lo que Mercurio está del Sol.

De hecho, se trata de una situación muy extraña: los modelos teóricos, desarrollados por los astrónomos sobre la formación de los sistemas planetarios, parecen demostrar que los planetas grandes como Júpiter no pueden formarse tan cerca de la estrella central donde, si acaso, se formarían planetas de tipo terrestre, mucho más pequeños. Si esta medición, confirmada, además, por otros grupos de investigación, tuviese un fundamento sólido, sería necesario reconsiderar a fondo todas las teorías sobre la formación de sistemas planetarios en general y, por tanto, quizá también la de nuestro sistema solar.

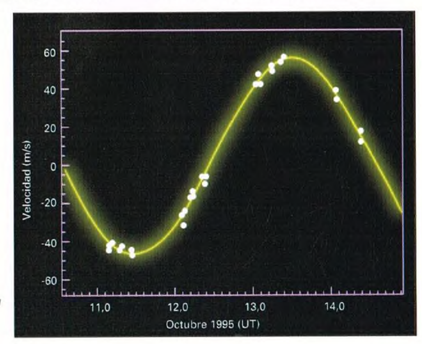
Abajo, representación pictórica de un hipotético paisaje visible desde el planeta de la estrella 51 **Pegasi.**



LOS RECIÉN LLEGADOS

Pero esto sólo fue el inicio. A principios de 1996, Geoffrey Marcy, de la Universidad de San Francisco, y Paul Butler, de la Universidad de California, publicaron unos resultados para las estrellas 70 *Virginis* y 47 *Ursae Majoris* similares a los de 51 *Pegasi*. La primera, 70 *Virginis*, es una estrella ligeramente más fría que el Sol, de magnitud 5 y situada a unos 80 años luz de la Tierra. Parece tener un planeta de masa igual a seis o siete veces la de Júpiter, a una distancia aproximadamente igual a la mitad de la que hay entre la Tierra y el Sol. La segunda, 47 *Ursae Majoris*, está a unos 46 años luz de nosotros; tiene un planeta de una masa al menos doble de la de Júpiter y a una distancia de cerca del doble de la de la Tierra al Sol. Una vez más, los dos descubrimientos se han hecho con mediciones de velocidad radial.

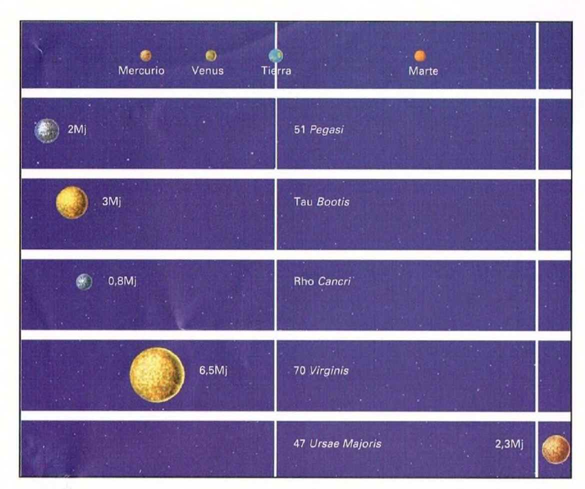
A la derecha, el gráfico muestra el perfecto comportamiento sinusoidal de la variación de la velocidad radial de 51 **Pegasi.**



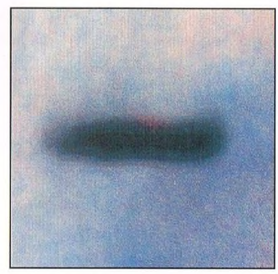
También a principios de 1996, el astrónomo estadounidense Christopher Burrows orientó el telescopio espacial Hubble hacia el famoso disco de la estrella Beta *Pictoris*, observando una pequeña deformación imputable a un planeta de pequeña masa que orbitaría alrededor de la estrella.

Entre abril y mayo de 1995, la técnica de la velocidad radial puso de manifiesto la posibilidad de la existencia de planetas alrededor de las estrellas Rho *Cancri* y Tau *Bootis*. Para la primera, situada a 46 años luz de la Tierra, se trataría de un planeta con una masa equivalente a 0,8 la de Júpiter; para la segunda, de un planeta igual a 3 masas de Júpiter. En ambos casos, los planetas estarían situados a una distancia bastante pequeña de sus respectivas estrellas.

Existe un caso incierto: el de Lalande 21185, una de las estrellas más



En esta tabla se ven algunos de los planetas descubiertos recientemente gracias a las diversas técnicas que se describen en el texto. Sus dimensiones y las distancias a su estrella madre se comparan con las características similares de los planetas de nuestro sistema solar. Mj indica la masa de Júpiter.





A la derecha, en esta extraordinaria imagen del telescopio espacial Hubble, puede verse el llamado* proplyd *(disco protoplanetario) que circunda una estrella en la región de Orión. En la imagen de arriba se ve la cubierta de polvo que rodea por completo la estrella recién nacida, mientras que en la imagen de abajo, tomada con una técnica diferente, se ve la estrella asomando entre el polvo.

cercanas al Sol, anunciado en junio de 1995 por el científico George Gatewood durante un congreso de astronomía. Esta estrella es una enana roja que parece tener un verdadero sistema planetario formado por tres planetas (sería el primer descubrimiento de este género), cada uno de masa similar a la de Júpiter, y cuyos períodos serían, respectivamente, de 5,8 años, 30 años y aún mayor para el tercero. En este último caso, el descubrimiento se hizo con mediciones de astrometría, es decir, midiendo las variaciones de posición.

Finalmente, hay hipótesis, todavía por confirmar, que contemplan la posible presencia de planetas alrededor de las estrellas CM *Draconis* e, incluso, *Proxima Centauri*, la estrella más cercana a nuestro sistema solar. Y hay otras estrellas que están en observación.

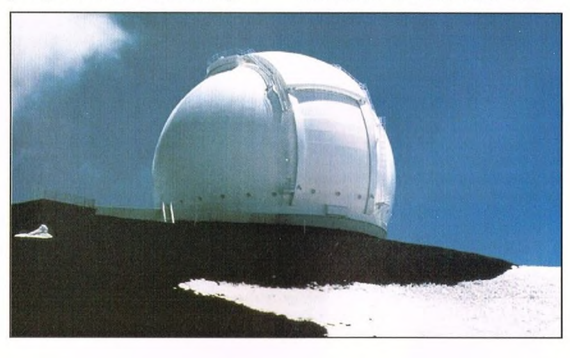
En resumen, es posible que el sistema solar tenga una discreta compañía.

EL FUTURO

Todavía estamos lejos de poder observar los planetas de otras estrellas. Sin embargo, en los últimos tiempos se han dado pasos de gigante en esta dirección y los resultados ya empiezan a notarse. Es razonable prever que dentro de unos 20 años tendremos indicios precisos de la existencia de sistemas planetarios similares al nuestro y, probablemente, los podremos ver con los potentísimos telescopios que en la actualidad se construyen. Entonces, será muy interesante descubrir si existen planetas similares a la Tierra y, en caso afirmativo, si albergan vida.

Éste es uno de los grandes retos que, en el futuro, habrá de afrontar la astronomía.

La NASA ha propuesto utilizar el telescopio Keck del observatorio de Mauna Kea, en Hawai, para la búsqueda de los planetas extrasolares. Con su espejo compuesto, es actualmente el telescopio en funcionamiento mayor del mundo.



ATLAS ESTELARES Y CATÁLOGOS

El paciente trabajo de los astrometrólogos ha acompañado siempre a los navegantes en sus rutas y a los astrónomos en sus tareas de observación. Hoy en día atlas sofisticados y muy precisos guían los satélites y las sondas en su navegación espacial.



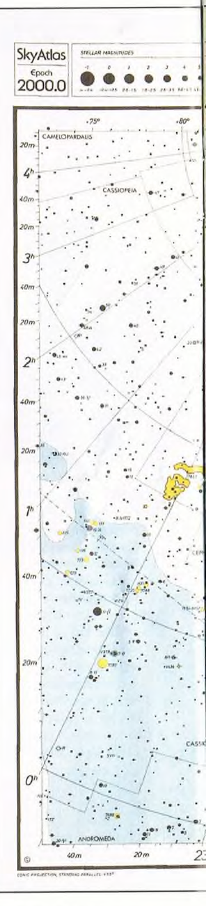
La radiación que proviene de las estrellas y de los astros puede estudiarse de diversas maneras. Se puede analizar la luz que nos llega para medir las características físicas de un astro. De ello se ocupa una disciplina llamada genéricamente astrofísica. Una segunda posibilidad es medir la dirección desde la que llega la radiación luminosa al observador. El conjunto de técnicas y resultados de estas mediciones de posición en la bóveda celeste constituye el campo de estudio de la astrometría. La astrometría fundamental se ocupa de encontrar un sistema absoluto de referencia o de coordenadas. En un experimento científico, la creación de un sistema de referencia siempre es el punto de partida para la medición de cualquier magnitud. En astronomía, todas las observaciones se hacen en un punto de la bóveda celeste, y la posibilidad de determinar la dirección precisa en que se produce un fenómeno es esencial para poder asociarlo a los astros observados y, por tanto, para poder empezar el trabajo científico que supone la interpretación física de los acontecimientos. Hoy, las observaciones se efectúan en diversas regiones del espectro electromagnético. Los radiotelescopios detectan grandes chorros de materia mientras son expulsados de los núcleos de las galaxias, y los satélites observan las violentas emisiones de energía de rayos X y gamma. ¿Cómo sería posible identificar qué galaxia, cuásar o estrella está emitiendo energía sin disponer de un sistema de referencia preciso y adecuado en el cual sea posible situar todas las observaciones? El sistema de coordenadas celestes permite identificar en las fotografías el astro responsable, medir la velocidad con que se desarrolla un fenómeno y saber cómo se desplaza un cuerpo celeste.

En estrecha correlación con las mediciones astrométricas están las de la posición de la Tierra y las del transcurso del tiempo (duración del día, del año, etc.). Esto se debe al hecho de que el único medio de crear un sistema de coordenadas absolutas en el cielo consiste en medir las posiciones de un buen número de estrellas distribuidas lo más uniformemente posible por la bóveda celeste. Estas mediciones se efectúan adoptando una posición fija en la Tierra que, como sabemos, gira y se mueve. La solución de estos problemas de medida coincide con la historia de los instrumentos astronómicos, desde la esfera armilar y los instrumentos de pasos, hasta la cartografía, que permite un posicionamiento preciso en la esfera terrestre del instrumento con el que se efectúan las observaciones. El observatorio de Greenwich, al que se debe gran parte de los catálogos elaborados durante los dos pasados siglos, fue financiado inicialmente para que proporcionara un instrumento de navegación a los innumerables buques del Imperio británico, que tenía posesiones en todo el mundo.

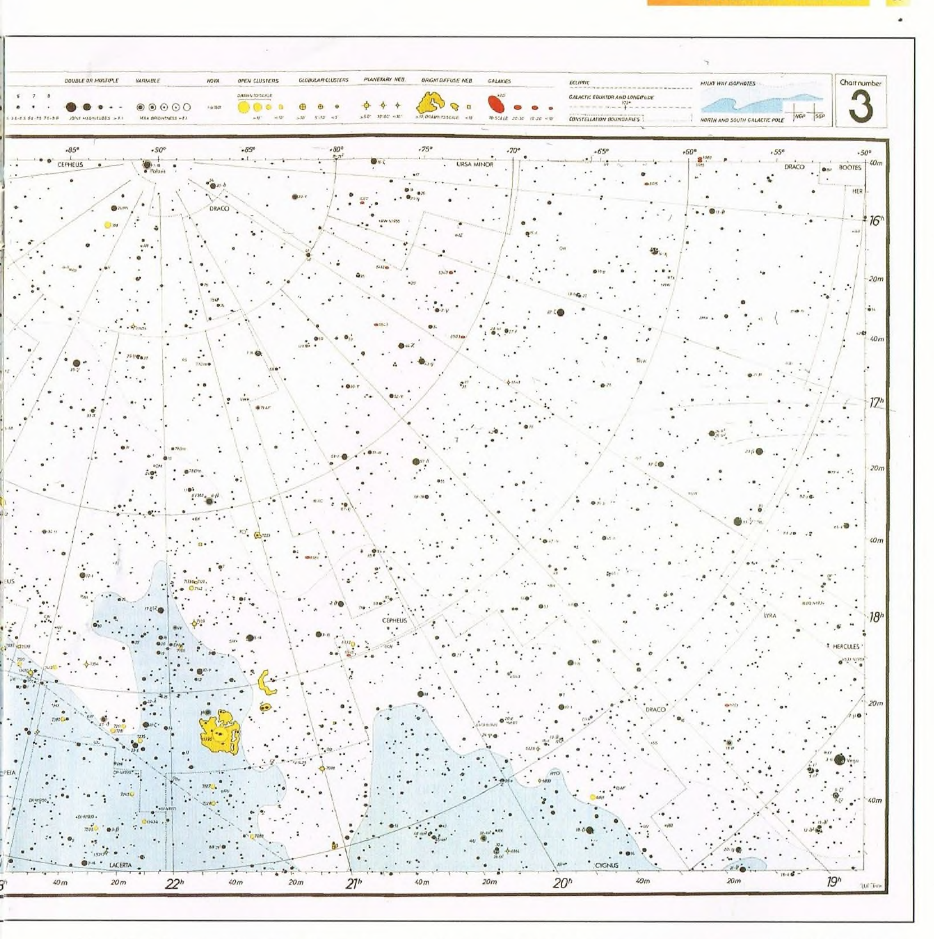
CIELO Y TIERRA

El conocimiento exacto de la posición de las estrellas permite medir la situación de un observador en el globo terrestre. Por esto, los astrónomos de los siglos pasados también eran los cartógrafos oficiales de los diversos países europeos. Indispensables para la navegación de los buques de las potencias marítimas y utilizados para los cálculos de las rentas catastrales de regiones interiores, los mapas confeccionados por los astrónomos se consideran hoy obras maestras de arte y precisión amanuense. El astrónomo francés Messier, célebre por su catálogo de objetos estelares, era un experto en el oficio de la cartografía. La exactitud de los dibujos y de las observaciones daba la medida de la calidad del trabajo en aquellos tiempos.





A la izquierda, el hemisferio austral reconstruido por Andreas Cellarius en su* Harmonia Macrocosmica *de 1661. En esta obra, Cellarius incluyó constelaciones menores inventadas por Plancius en 1598, como el Cangrejo Menor, dibujado como una langosta.

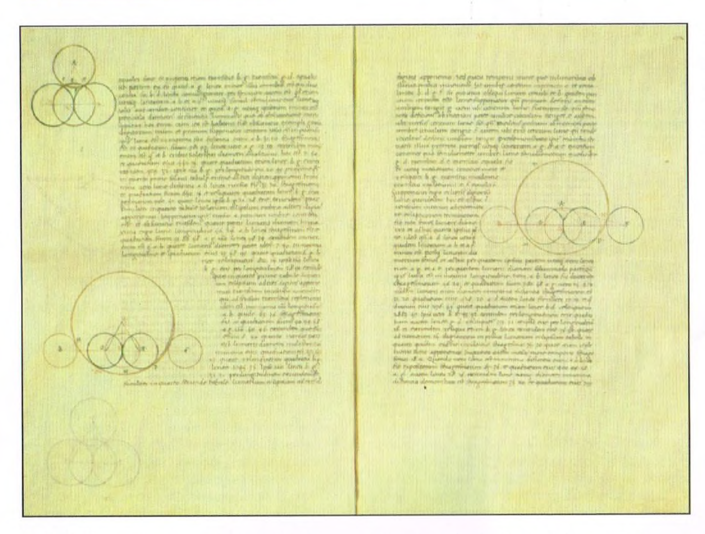


El desarrollo de la astronomía conllevó el progreso de la tecnología utilizada posteriormente para la construcción de instrumentos cada vez mejores.

Los primeros aparatos de una cierta precisión fueron la esfera armilar y el cuadrante. Características comunes a ambos son una serie de círculos o arcos de círculo graduados y una mirilla constituida por una ranura en una parte del círculo (a la que se acercaba el ojo), así como una retícula de hilos muy finos situada en el centro del círculo, o diametralmente, que se utilizaba para apuntar la visión hacia la estrella.

Por tanto, la precisión de estos instrumentos estaba limitada, por una parte, por la capacidad del observador para centrar la estrella y, por otra, por la precisión con que se grababan previamente los círculos y la exactitud de las lecturas que efectuaba el observador. Un salto cualitativo se produjo con la invención del nonio decimal, debida a P. Vernier, que permitía una medición precisa (e independiente del ojo del observador) de las cifras decimales de los grados leídos en el cuadrante y, por tanto, el empleo de microscopios ópticos para la lectura del círculo

Arriba, una página del* Sky Atlas 2000.0*, de W. Tirion. Este atlas muestra las estrellas hasta la magnitud 8 y todos los objetos no estelares (nebulosas, galaxias, etc.).



A la izquierda, una doble página del catálogo de las posiciones estelares del **Almagesto** ***de Tolomeo. Describe la estrella Rigel de la constelación de Orión, considerada de primera magnitud.***

graduado. De esta manera, se pudo elevar el nivel de precisión que permitían estos instrumentos. La solución más moderna, todavía hoy utilizada, consiste en el empleo de telescopios para el seguimiento exacto de los astros en su movimiento diurno.

Los instrumentos de pasos, como los construidos en los observatorios de Greenwich, cerca de Londres, y de Pulkovo, cerca de San Petersburgo, dieron las medidas astrométricas más precisas antes de la llegada del satélite Hipparcos. Los catálogos de los principales instrumentos de pasos (como el de La Palma, en las islas Canarias) todavía son hoy esenciales para las operaciones de puesta a punto de un telescopio antes de cualquier observación astronómica. La publicación más difundida, el *Yale Bright Star Catalog*, está en todos los observatorios astronómicos modernos.

NÚMEROS E IMÁGENES

La utilidad de los números que expresan las coordenadas celestes para los cálculos náuticos y astronómicos corre pareja con la fascinación, belleza y sugerencias de los mapas del cielo estrellado, dibujados y creados en base a los catálogos estelares. Estos atlas se utilizan hoy para reconocer las regiones

Los astrónomos del observatorio de Brera utilizaron cuadrantes puestos en posición fija colocados en una pared o bien en posición móvil. En la figura, el cuadrante mural de Ramsden (construido en Londres en 1789). Instrumentos como éstos se exponen en el Museo de la Ciencia de Milán y en el observatorio de Brera.



Abajo, el círculo multiplicador de Reichenbach utilizado por primera vez en el observatorio astronómico de Brera en 1810. Lo empleó el astrónomo Barnaba Oriani para medir la declinación de las estrellas circumpolares.



del cielo que se están observando y encontrar en ellas el objeto que interesa o descubrir nuevos astros, así como para medir los desplazamientos de los objetos en movimiento (cometas, asteroides, planetas, etc.). Los atlas modernos son parte integrante de los catálogos: basta un ordenador con capacidades gráficas, aunque sean mínimas, para poder crear pequeños mapas del cielo a partir de una lista de coordenadas. En el pasado, esto no podía hacerse. Los dibujantes tenían que basarse en los catálogos disponibles, pero la precisión de la cartografía se mezclaba con el arte de ilustrar los personajes mitológicos y los objetos cuyo nombre llevan las constelaciones. Por tanto, los pequeños mapas dibujados no siempre eran fiables para una observación exacta del cielo y, a menudo, cada astrónomo tenía que crear sus propias identificaciones. Pero hoy continúan siendo obras maestras que evocan la visión que los científicos del siglo pasado tenían de la bóveda celeste.

Arriba, instrumentos antiguos de navegación. Constituyen el llamado* Composium astronómico holandés *y se conservan en París, en la Colección de Antigüedades Marinas.

LA URANOMETRÍA DE BAYER

En 1603, Johannes Bayer publicó su atlas *Uranometria Nova*, en el que se incluyen las 48 constelaciones que Tolomeo había descrito en su catálogo, conocido como *Almagesto*, y otras nuevas del hemisferio sur. En este catálogo, Bayer introdujo por primera vez la nomenclatura estelar que todavía hoy se utiliza y que designa las estrellas con una letra del alfabeto griego, empezando con alfa para la estrella más brillante. En la figura se mencionan las primeras estrellas de la constelación de Andrómeda.

ANDROMEDA.

Mulier cathenata, Abrahamo Iudæo, carens omninò Germanico Virgo deuota, Persea, quibusdam vitulus marinus cathenatus.

DIARTHROSIS.

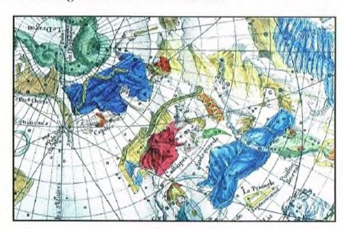
	α	Caput Andromedæ. ὁ κοινὸς ἵππου καὶ ἀνδρομέδας ἀστήρ. Hyginus: Eadem enim stella & umbilicus Pegasi, & Andromedæ caput appellatur.		
12	β	Ptolemæo ἐν τῷ περιζώματι Australior, Arabibus Mirach, rectius Mizar, latinis Ventrale, plurimis cingulum dicitur.	3	Secundi.
15	γ	In Australi pede lucida, Alamak, seu Almaak, perperam Alhames.		
2	δ	In eductione brachij sinistri Borealior, aliis in scapulâ dextrâ.	1	Tertij.
3	ε	Australior.		

Una página de la* Uranometria Nova, *de Johannes Bayer, publicada en 1603 en latín.

LA NAVEGACIÓN ESPACIAL

Hoy en día, los problemas de navegación marítima y terrestre se resuelven gracias a la red de satélites GPS, que proporcionan medidas con una precisión del orden de algunos centímetros a quien disponga de un receptor adecuado. Por tanto, el empleo de las posiciones de las estrellas para fijar un punto de destino y un rumbo parece un problema exclusivo de los astrónomos que hacen observaciones más allá de la órbita terrestre. Pero, actualmente, desde la Tierra se han lanzado numerosas sondas con destino tanto al espacio circumterrestre como a los cuerpos más lejanos del sistema solar. La sonda espacial Giotto, fue guiada por un sistema como el descrito.

La puesta a punto del telescopio espacial Hubble planteó el problema de orientar con extraordinaria precisión un satélite en órbita. Para permitir una orientación exacta del telescopio espacial, así como para programar con precisión una observación astronómica, se creó un nuevo catálogo mediante el análisis de la digitalización de las placas del famoso atlas fotográfico de Monte Palomar.



A la derecha, los mapas en color del* Planisphère céleste septentrional et méridional *fueron publicados por Philippe La Hire, en París, en 1705. Las figuras son muy parecidas a las de Bayer, trazadas un siglo antes.

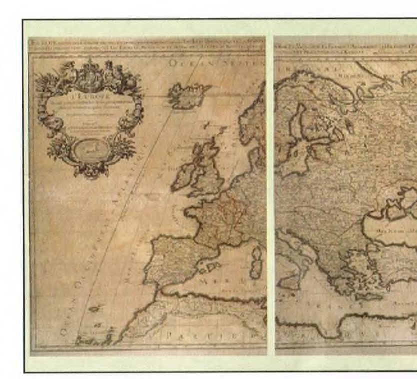


A la derecha, el instrumento de pasos Carlsberg, en las montañas de las islas Canarias. Con este instrumento, se elabora cada año el catálogo de posiciones de La Palma.

Los catálogos de posición de mayor precisión son: AGK3, la última versión del trabajo que empezó con la medición exacta de las posiciones de los catálogos BD, el *Bonner Durchmunsterung* de 1863 y del catálogo CD, el *Cordoba Durchmunsterung* para el cielo austral de finales de 1880; el SAO, catálogo de posiciones y movimientos propios, del Smithsonian Astrophysical Observatory; y el más moderno y preciso, el PPM. Estas siglas corresponden a Position and Proper Motion: se trata de un catálogo de posiciones y movimientos propios de 181.731 estrellas del hemisferio norte y de 197.179 estrellas del hemisferio sur, completado a principios de los años noventa. Sin embargo, todos estos catálogos se limitan a las estrellas relativamente brillantes. El PPM es un catálogo completo hasta la magnitud 7,5 y el número de estrellas hasta este brillo todavía es exiguo para las necesidades de guía del telescopio espacial.

El campo visual de este telescopio es muy pequeño y, por tanto, se necesita una cantidad de estrellas enorme para orientarlo con precisión hacia cualquier dirección del cielo. Por tanto, se compiló el GSC, el *Guide Star Catalog*, que contiene cerca de 19 millones de posiciones de estrellas entre las magnitudes 6 y 15. La precisión astrométrica del catálogo se obtiene comparando las posiciones con las del catálogo PPM, aunque el catálogo no contiene indicaciones de los movimientos propios de las estrellas.

La necesidad de mediciones más precisas condujo la ESA a la construcción de un satélite con esta finalidad, el HIPPARCOS (High Precision Parallax Collecting Satellite). El satélite se lanzó en agosto de 1989, pero una súbita avería en los motores que lo habrían colocado en la órbita geoestacionaria obligó a introducir un cambio en la organización de las observaciones. Sin embargo, la operación fue un éxito y el satélite estuvo transmitiendo datos de manera continua hasta el 15 de agosto de 1993, fecha en que las comunicaciones quedaron interrumpidas. El catálogo producido se publicará en el transcurso de 1997. La precisión de las posiciones será tan alta porque el HIPPARCOS puede distinguir dos pelotas de golf colocadas juntas en la orilla americana del océano Atlántico. El nuevo sistema de referencia será lo más parecido posible a un sistema inercial porque ninguna estrella se ha considerado fija y su situación tradicional se ha fijado tomándola finalmente de las galaxias exteriores. El futuro de la astrometría está en el estudio de la Agencia Espacial Europea: el proyecto GAIA prevé el lanzamiento en 2009 o 2014 de un satélite que podrá medir, con la precisión de 10 microsegundos de arco, la posición y el movimiento propio de unos 50 millones de estrellas de la Vía Láctea.



Arriba, en el Archivo Histórico del observatorio astronómico de Brera se conservan muchos mapas terrestres que los astrónomos contribuyeron a trazar con sus observaciones. Este mapa de Europa procede de la* Colección cartográfica *de Sanson de los años 1673-1686.

OTROS CATÁLOGOS

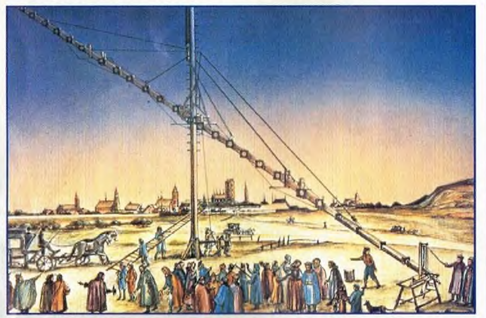
La catalogación tiene una importancia tan grande en los procedimientos científicos tradicionales que se han creado innumerables catálogos estelares. Existen volúmenes enteros que recogen las listas de los diversos catálogos que se confeccionan cada año. Son de particular importancia los catálogos estelares fotométricos, que permiten a los observadores calibrar sus mediciones y establecer la magnitud de los objetos



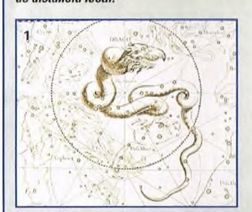
Las esferas armilares son una reproducción del cosmos, con la Tierra, colocada en el centro, y la esfera celeste, representada por el ecuador y algunos meridianos fundamentales, a su alrededor. También está colocado el círculo de la eclíptica. La esfera armilar servía para hallar las posiciones en la bóveda celeste y se utilizaba a la manera de una mirilla. La precisión con la que se podían medir las posiciones de las estrellas era sólo de 15 minutos de arco. Esta esfera, de 1766, está expuesta en el Museo de la Ciencia de Milán. Las esferas armilares se utilizaron desde el siglo III a.C., y los primeros catálogos se compilaron según las observaciones efectuadas con estos instrumentos.

EL ATLAS DE JOHANNES HEVELIUS

El nombre completo del atlas trazado por Johannes Hevelius (1611-1687) es *Firmamentum Sobiescuanum sive Uranographia* y contiene 56 grabados de mapas celestes. Las posiciones de las estrellas fueron medidas por el mismo Hevelius, y las imágenes de las constelaciones se realizaron como si se estuviese observando desde el exterior un globo dibujado de tal manera que en su centro estuviese la Tierra. Resultan tan espectaculares como si se observaran desde tierra. Con su atlas, Hevelius introdujo nuevas constelaciones, como el Escudo y el Perro de Caza, e incluyó en el hemisferio sur las posiciones de 341 estrellas medidas por Edmond Halley durante una visita que hizo a la isla de Santa Elena. Las reproducciones proceden del original que se guarda en el Archivo Histórico del observatorio astronómico de Brera. Abajo se reproducen las tablas de las constelaciones del Dragón, de la Nave Argos y los dos hemisferios celestes.



En esta ilustración se representa el famoso telescopio de Hevelius, de 45 m de distancia focal.

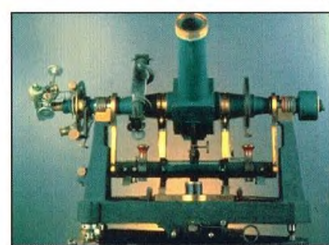






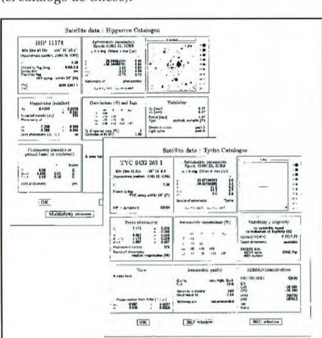


Estas cuatro imágenes corresponden a las constelaciones del Dragón (1) y de la Nave Argos (2), el hemisferio septentrional (3) y el austral (4) de la Uranographía *de Hevelius.*



Arriba, este instrumento de pasos pertenece a la Colección Histórica del observatorio de Brera. Fue construido por A.G. Bamberg, un astrónomo de Berlín, en 1923-1924. Su particularidad está en su montura de telescopio por piezas, en el cual el rayo de luz, después de haber entrado en el objetivo orientable del telescopio, es desviado a lo largo de una línea horizontal; de esta manera, el observador puede permanecer en la misma posición, independientemente de la altura de la estrella en el horizonte.

que interesan (durante mucho tiempo, la secuencia polar internacional de magnitudes, IPS, para algunas estrellas situadas alrededor del polo Norte celeste ha sido de referencia para cualquier medición fotométrica). Existen catálogos de espectros estelares (como el HD, compilado por Henry Draper) y de las estrellas que hay en el entorno del sistema solar (el catálogo de Gliese).



Arriba, el satélite HIPPARCOS ha elaborado dos catálogos estelares fundamentales. El llamado Hipparcos contiene 118.218 estrellas con su posición medida con una precisión de un milisegundo. La magnitud de las estrellas tiene una precisión de 0,0015 magnitudes, y ha sido medida unas 110 veces por estrella. De este modo se han descubierto 2.700 nuevas estrellas variables y 12.195 estrellas dobles o múltiples. En cambio, el catálogo Tycho contiene 1.058.332 estrellas, pero con la posición medida con una precisión de 25 milisegundos. Las estrellas tienen magnitudes hasta la 10,5-11,0. Los catálogos son los mapas más completos y exactos del cielo que se han producido hasta hoy.

LA JIRAFA

La Jirafa* (Camelopardalis) *está en las proximidades del polo Norte celeste. Al estar compuesta por estrellas débiles puede resultar difícil de localizar en el cielo.



Constelación de origen reciente (aparece en el planisferio de Bartsch de 1624), la Jirafa representa el animal homónimo de largo cuello. Las estrellas de esta región celeste son poco luminosas, hasta el punto de que no hay en ella astros de magnitud inferior a la cuarta.

CÓMO LOCALIZAR LA CONSTELACIÓN

Tal como sucede en otras agrupaciones de estrellas débiles, la mayor dificultad para la identificación de esta constelación es llegar a percibir los astros que la componen.

Para encontrar la Jirafa, podemos observar la región que hay entre las estrellas Alfa y Beta de la Osa Mayor y la característica «W» formada por las estrellas más luminosas de Casiopea. La Jirafa comprende la gran porción de cúpula celeste que separa estas dos constelaciones.

ESTRELLAS PRINCIPALES

Alfa (magnitud 4,3) no es la estrella más brillante de la constelación y es superada, aunque poco, por Beta (magnitud 4). Se trata de una estrella supergigante azul que debe este color a la elevada temperatura de su superficie.



Arriba, NGC 2403 es una galaxia del Grupo Local, la misma familia a la que pertenece la Vía Láctea.

En cambio, Beta es una estrella doble, resoluble incluso con pequeños telescopios. La compañera de la estrella principal está situada a más de 1' de distancia y es de novena magnitud.

Otro sistema doble está formado por el par de estrellas llamado Σ (sigma) 1694, así indicado por su posición en el catálogo de Struve, el astrónomo que lo estudió por primera vez. Está compuesto por dos astros que brillan con luz blanca (magnitudes 5,3 y 5,9) y distan de nosotros algunos centenares de años luz.

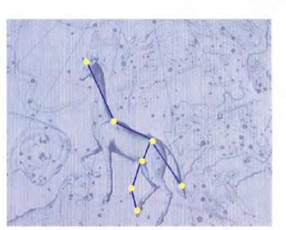
52 *Camelopardalis* es una estrella en el límite de la visibilidad a simple vista, incluso en las noches que presentan las mejores condiciones de observación, porque es de sexta magnitud.

OTROS OBJETOS DE LA JIRAFA

Al estar situada en una amplia área de la bóveda celeste, que va desde regiones alejadas de la Vía Láctea hasta zonas atravesadas por el plano galáctico, la Jirafa contiene objetos típicos del cielo más profundo, como galaxias, y objetos que están en las proximidades del ecuador de nuestra isla estelar. Con un telescopio pueden observarse al menos dos galaxias: NGC 2403 e IC 342.

La primera es una galaxia del Grupo Local, es decir, del sistema de galaxias formado por nuestra Vía Láctea, las Nubes de Magallanes y otros sistemas cercanos a ellas. Está situada a 11 millones de años luz y aparece como un penacho luminoso de novena magnitud. Su estructura, como la de muchas otras galaxias, entre ellas la nuestra, es espiral, pero, a diferencia de la Vía Láctea, sólo contiene unos pocos miles de millones de estrellas.

En cambio, para observar la segunda, que es de magnitud 12 y también forma parte del Grupo Local, se requieren telescopios más potentes, de un diámetro superior a 15 cm. Un objeto mucho más cercano y de fácil observación es NGC 1502, un cúmulo abierto situado a unos 4.000 años luz de nosotros y formado por unas 15 estrellas.



Arriba, a diferencia de la mayor parte de las constelaciones del hemisferio boreal, cuyo origen se remonta al período clásico, la Jirafa nació hace sólo unos cuatro siglos, probablemente porque está formada por estrellas muy débiles.



LOS MITOS Y LAS ESTRELLAS

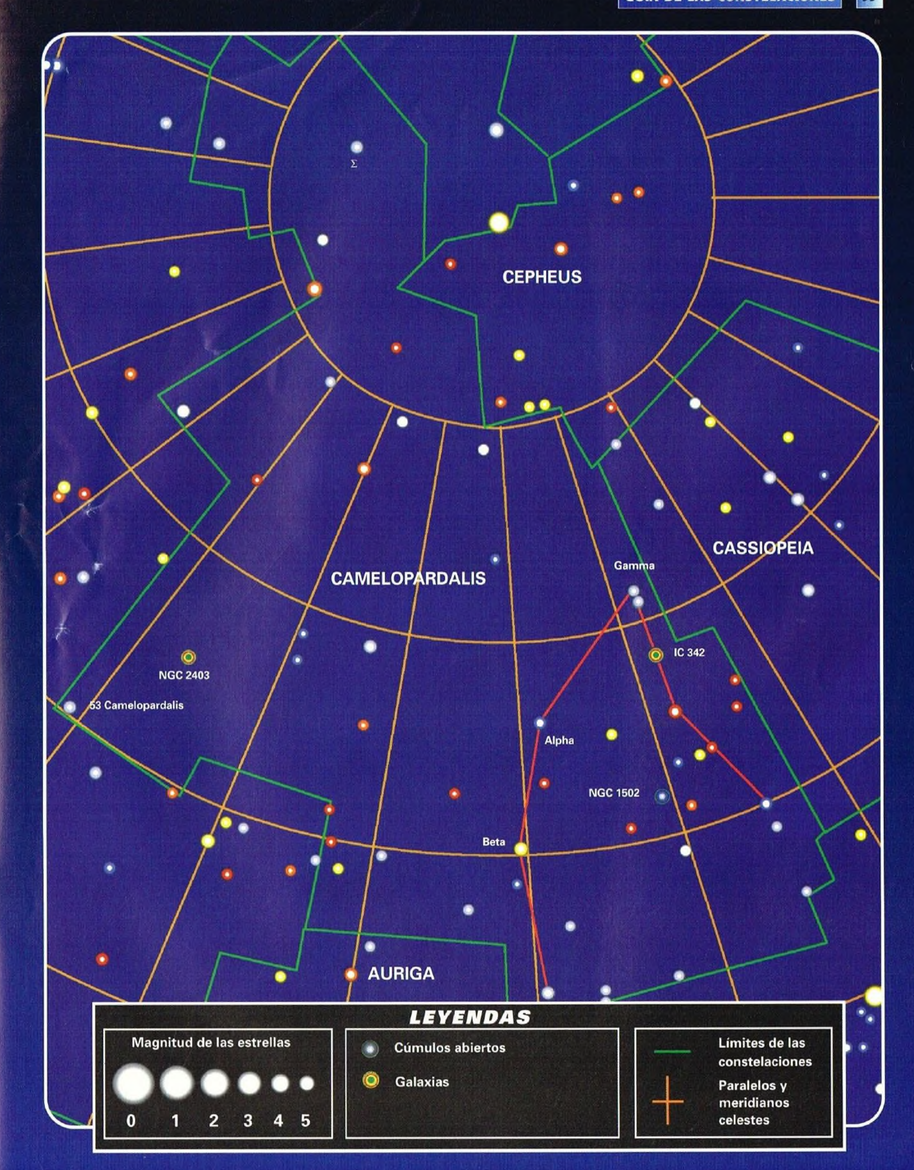
LA JIRAFA

Como es una constelación de introducción reciente faltan leyendas que puedan asociarse a la Jirafa. Sin embargo, nos recuerda las bodas de Isaac y Rebeca, pues para celebrar la ceremonia la esposa llegó a Canaan montando una jirafa. Se debe a Plancius, astrónomo holandés, el mérito de haber llenado esta región del firmamento que, de otro modo, habría permanecido vacía por la ausencia de estrellas suficientemente luminosas que justificaran la introducción de una constelación. Sin embargo, fue Bartsch, yerno de Kepler, descubridor de las leyes que regulan el movimiento de los cuerpos celestes, quien la dio a conocer universalmente al colocarla en su planisferio.

DÓNDE BUSCARLA

LA JIRAFA

La constelación de la Jirafa abarca una región del cielo comprendida entre 53° N y 86° N de declinación, y entre 3 horas 10 minutos y 14 horas 30 minutos de ascensión recta. Es íntegramente visible todo el año desde latitudes más al norte que 37° N y parte del año desde latitudes comprendidas entre 37° N y 4° S. Por debajo de 4° S sólo es parcialmente visible. La zona más importante de la constelación, la que contiene las estrellas Alfa y Beta, está en oposición al Sol hacia finales de noviembre.


Σ
CEPHEUS
CASSIOPEIA
Gamma
CAMELOPARDALIS
IC 342
NGC 2403
53 Camelopardalis
Alpha
NGC 1502
Beta
AURIGA
LEYENDAS
Magnitud de las estrellas
0 1 2 3 4 5
Cúmulos abiertos
Galaxias
Límites de las constelaciones
Paralelos y meridianos celestes

SETI

Las posibilidades de captar señales de radio procedentes de civilizaciones extraterrestres son pocas. A pesar de ello, desde principios de los años setenta se han emprendido investigaciones que todavía hoy continúan.



La SETI (The Search for Extraterrestrial Intelligence; búsqueda de inteligencia extraterrestre) es una ciencia muy joven de la que se ocupan un número limitado de investigadores debido a la falta de financiación y a la escasez de medios disponibles.

UN POCO DE HISTORIA

Aunque el interés por la existencia de formas de vida extraterrestres es tan antiguo como la humanidad, la moderna SETI no se puso en marcha hasta 1959. En aquel año, dos físicos de la Cornell University, Giuseppe Cocconi y Philip Morrison, publicaron un artículo en la revista *Nature* en el que exponían las posibilidades de uso de las microondas para comunicaciones interestelares. En aquella época, un joven radioastrónomo, Frank Drake, independientemente de aquéllos, había llegado a las mismas conclusiones y, en 1960, empezó las primeras búsquedas de señales radioeléctricas procedentes de otros posibles sistemas solares.

Durante dos meses, Drake apuntó la antena de 25 m de West Virginia hacia dos estrellas similares al Sol y relativamente próximas a la Tierra. Esperaba oír eventuales señales extraterrestres en la «mágica» longitud de onda de 21 cm (1.420 MHz), que corresponde a la emisión del hidrógeno.

Si bien Drake no tuvo la suerte de escuchar señales extraterrestres, su proyecto, llamado proyecto OZMA, animó a otros astrónomos a proseguir su intento. En particular, los rusos mostraron un gran interés.

Así, en los años sesenta, la SETI estuvo dominada por la investigación soviética,

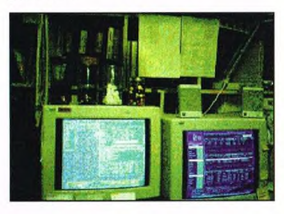


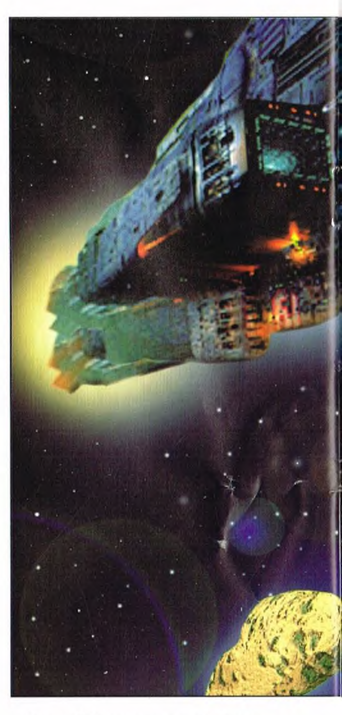
Arriba, la insignia del proyecto Phoenix, punta de lanza de la SETI.

a pesar de que no fue una investigación muy sistemática. En lugar de dirigir su atención a estrellas próximas, prefirieron utilizar antenas omnidireccionales, es decir, capaces de escrutar grandes regiones del cielo. Las investigaciones se basaban en el supuesto de que en el espacio debía haber pocas civilizaciones tecnológicamente avanzadas, pero que, de haberlas, dispondrían de sistemas muy potentes de transmisión de mensajes de radio.

A principios de los años setenta, el Ames Research Center de Mountain View, de la NASA, California, emprendió con entusiasmo una investigación similar y se dedicó a poner a punto la tecnología necesaria.

Un equipo de investigadores exteriores a la NASA, bajo la dirección de Bernard Oliver, dio cuerpo a un proyecto llamado Cyclops, que se centraba en las tecnologías necesarias para ponerse a la escucha, con un trabajo serio y continuado, de eventuales señales procedentes de inteligencias extraterrestres, trabajo al que han hecho referencia muchas de las investigaciones que se efectuaron en los años siguientes. Esto motivó que más tarde los estadounidenses se interesaran por la SETI.





Algunos de los proyectos que siguieron están en marcha actualmente o acaban de terminarse con una tecnología mucho más sofisticada. Entre ellos, cabe mencionar el proyecto META de la Planetary Society,

Abajo, el director del proyecto Argus, Paul Shuch, recoge datos con un radiotelescopio portátil. A la izquierda, el sistema de control general que rige la actividad del proyecto Phoenix; puede verse el monitor y el ordenador.



Arriba, en esta representación pictórica, realizada con tecnología digital, se ve un sugestivo escenario espacial del futuro.

el proyecto SERENDIP, desarrollado por la Universidad de California, y un largo programa de observaciones de la Ohio State University.

A finales de los años setenta, el Ames Research Center de la NASA y el Jet Propulsion Laboratory (JPL) de Pasadena, California, decidieron tomar parte activa en la búsqueda de señales extraterrestres. Propusieron dos estrategias diferentes: el Ames deseaba examinar mil estrellas similares al Sol con una búsqueda bien planificada, mientras que el JPL proponía una búsqueda en todas direcciones del cielo.



El presidente de la SETI, Richard Factor, pronunciando el discurso inaugural en el lanzamiento del proyecto Argus, uno de los más comprometidos de la SETI.

CIVILIZACIONES EXTRATERRESTRES

Las estadísticas sugieren que en el universo, e incluso en nuestra Galaxia, podrían existir muchas civilizaciones tecnológicamente desarrolladas. El nivel de su tecnología podría ser mucho más sofisticado que el nuestro.

En 1988, después de casi 10 años de estudios para definir la mejor estrategia, los responsables de la NASA propusieron la adopción de la segunda estrategia. Cuatro años más tarde, con ocasión del quinto centenario de la llegada de Cristóbal Colón a América, se iniciaron las escuchas. Pero, después de poco menos de un año, el Congreso de los Estados Unidos cortó los fondos.

De esta manera, muchos investigadores abandonaron su empeño, mientras algunos se dedicaban a buscar financiaciones privadas. El proyecto Phoenix concentró los esfuerzos de la parte del proyecto SETI de la NASA conocido como Target Search, un proyecto que debía examinar mil estrellas próximas a nosotros y similares al Sol. Para

EL SETI INSTITUTE

El SETI Institute lleva a cabo investigaciones científicas sobre la vida en el universo, con especial atención en la búsqueda de inteligencias extraterrestres. El instituto tiene más de 25 años de vida, muchos de los cuales los ha dedicado a la investigación de los factores que definen la ecuación de Drake. De estas investigaciones, la más moderna es el proyecto Phoenix, de cuya continuación se ha hecho cargo la High Resolution Microwave Survey de la NASA, ya que el proyecto se había dado por terminado al cabo de un año de vida, en octubre de 1993. Entre los otros proyectos de la SETI, hay que recordar:

- Definición de experimentos de exobiología para las futuras misiones en Marte, después del descubrimiento de eventuales bacterias fósiles en un meteorito del planeta rojo.
- Investigaciones destinadas a la observación de estrellas y sistemas planetarios en formación.
- Investigaciones de apoyo y actividades tecnológicas para vuelos de experimentos de exobiología.
- Investigaciones sobre la abundancia química y las condiciones físicas en las regiones de estrellas en formación y en las proximidades de 1987A.
- Exploración de Marte y su clima.
- Identificación de planetas extrasolares.



Arriba, una panorámica de la Phoenix Workstation que efectúa la monitorización de la Targeted Search.

ello, se emplearon las antenas más grandes y sensibles de la Tierra, que ya se habían utilizado antes para la SETI.

Dentro de pocos años, gracias a la experiencia de casi una década, todas las interferencias terrestres que hacen difícil distinguir eventuales –y débiles– señales inteligentes extraterrestres, serán insignificantes. El proyecto Phoenix puede considerarse como el experimento SETI más completo nunca realizado hasta hoy.

EL PROYECTO PHOENIX

La finalidad del proyecto Phoenix es sencilla: encontrar evidencias de una inteligencia no terrestre en el universo. Para lograr este objetivo, el proyecto Phoenix se propuso estudiar, mucho más a fondo de lo que se había hecho hasta entonces, las señales procedentes de mil estrellas similares al Sol y relativamente próximas a nosotros.

Gracias a la cooperación con la NASA, el SETI Institute está hoy en condiciones de obtener el mejor resultado de las inversiones hechas en las últimas décadas. Además, todas las investigaciones del proyecto decenal de la NASA, cancelado al año de nacer, se pusieron a disposición del proyecto Phoenix.

Desde noviembre de 1993 hasta junio de 1995, el proyecto se ha dedicado a:

1. Hacer utilizables los instrumentos del proyecto NASA abortado en sus inicios. Hoy, estos medios permiten escuchar simultáneamente 57 millones de canales y reconocer de forma automática una posible señal artificial como tal, prescindiendo de sus características (continua, pulsante, variable en intensidad, etc.).
2. Observar durante unos cinco meses el cielo del hemisferio austral utilizando el radiotelescopio de Parkes (Australia), de 63 m de diámetro. Se ha programado para captar señales en las frecuencias comprendidas entre 1,2 y 3,0 GHz.

Después de las observaciones efectuadas en 1995 en Australia, la instrumentación del Phoenix se devolvió a California. Allí se mejoró la capacidad de búsqueda y se dio más eficacia al sistema operativo automático con el fin de poder escrutar el cielo con muy pocos operadores o incluso sin ninguno.

A finales de 1996, el sistema pasó al National Radio Astronomy Observatory de Virginia Occidental, donde se utiliza cuando no se están haciendo otras investigaciones.

A principios de 1998, el sistema informatizado se llevará a la mayor antena del mundo, el radiotelescopio de Arecibo, en Puerto Rico.

¿EN QUÉ FRECUENCIA ESCUCHAR?

Uno de los más importantes problemas ligados al estudio de las señales extraterrestres es la elección de la frecuencia adecuada alrededor de la cual hay que ponerse a la escucha.

En efecto, es necesario utilizar una frecuencia que no se confunda con los ruidos de fondo del universo. Se excluye la búsqueda de mensajes luminosos, porque las estrellas emiten una energía tan grande en la gama visible que los mensajes quedarían totalmente enmascarados por la luz estelar. En cambio, en el campo de las ondas de radio la situación es inversa: un mensaje artificial es fácil que tenga más energía que las radioemisiones naturales de las estrellas.

Pero considerando solamente las longitudes de onda radio disponibles, tenemos una gama que contiene de uno a dos mil millones de posibilidades. Por este motivo, como de momento no es posible construir instrumentos que puedan captar todas las frecuencias posibles, es necesario centrar la elección en algunas en particular: las que pueden considerarse más plausibles como medio para el envío de señales por parte de civilizaciones extraterrestres.

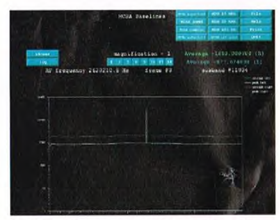
En 1995, los físicos Giuseppe Cocconi y Philip Morrison ya sugirieron la sintonía a la frecuencia de 1.420 MHz, que corresponde a la longitud de onda de 21 cm. Esta señal es emitida espontáneamente por el átomo de hidrógeno neutro cuando su electrón cambia el sentido de rotación sobre sí mismo respecto al sentido de rotación del protón. Hay que recordar que el hidrógeno es muy abundante en el universo y se encuentra en todas partes.

En consecuencia, si una civilización extraterrestre estuviese, al menos, tan desarrollada como la nuestra, seguramente conocería este fenómeno y, por tanto, podría utilizar señales de esta frecuencia, debidamente intensificadas y moduladas, para enviar eventuales mensajes.

Otra frecuencia que podrían utilizar los extraterrestres es la que emite la molécula OH, también muy abundante en el espacio.



Arriba, la pantalla principal del proyecto Phoenix, que sirve para sugerir observaciones y enviar instrucciones a las diversas subpantallas.



Arriba, gráfico que muestra la energía medida a diversas frecuencias en el marco del proyecto Phoenix.

Abajo, en el proyecto Phoenix se utilizan también como test las señales emitidas por sondas que viajan en el espacio, visibles en estas pantallas como líneas.





Server

Telescope	OK
RF/IF	OK
Remote TC	OK
Remote RF/IF	OK
FUDD	OK

TSS A

MCSA L	OK
MCSA R	OK
CWD L	OK
CWD R	OK
PD	OK
SCS Exec	OK

TSS B

MCSA L	OK
MCSA R	OK
CWD L	OK
CWD R	OK
PD	OK
SCS Exec	OK

Arriba, una pantalla múltiple del Phoenix que permite tener siempre bajo control el estado de los sistemas y subsistemas que controlan el proyecto.



Arriba, parte de la antena a través de la cual son conducidas las señales captadas en un amplio espectro de frecuencias.

LA FÓRMULA DE DRAKE

La búsqueda de vida inteligente en el universo parte de la suposición de que en la actualidad puede existir en medida tan elevada que haga estadísticamente posible un contacto. Pero, ¿se puede aventurar una hipótesis sobre cuántas son las civilizaciones tecnológicas existentes en nuestra Galaxia con las cuales cabe la posibilidad de entrar en contacto? Frank Drake y otros investigadores han establecido una fórmula que permite dar respuesta a esta pregunta. Según ellos, el número de civilizaciones tecnológicas existentes, y presumiblemente en condiciones de comunicarse a distancias interestelares, e interesadas en hacerlo, puede expresarse así:

$N = R^* \, fp \, na \, fv \, fi \, fc \, D$

donde: R^* es el ritmo medio de la formación de estrellas referido a la edad de la Galaxia; *fp* es la parte de estrellas que poseen sistemas planetarios; *na* el número medio de planetas en cada uno de los sistemas planetarios con ambientes favorables al origen de la vida; *fv* es la parte de tales planetas favorables en los que se desarrolla vida; *fi* es la parte de tales planetas habitados en los cuales, durante la vida del sol local, se desarrollan formas de vida inteligentes dotadas de capacidades manipulativas; *fc* es la parte de los planetas poblados por seres inteligentes en los cuales, durante la vida del sol local, surge una civilización técnica que avanza en el sentido anteriormente definido; y *D* es la duración de la civilización técnica. En base a datos estadísticos elaborados de manera compleja por Drake y los otros investigadores, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- el número de civilizaciones con superioridad significativa, desde el punto de vista tecnológico, sobre la nuestra que existen hoy en la Galaxia podría estar comprendido entre 50.000 y un millón;
- la distancia media entre las diversas civilizaciones técnicas está comprendida entre algunos centenares de años luz y unos 1.000 años luz;
- la edad media de una civilización tecnológica que se dedique a las comunicaciones interestelares debería ser de 10.000 años o más.

El intervalo de frecuencias que va desde 1.420 a 1.721 MHz, es decir, desde la emisión del hidrógeno a la de la molécula OH, se llama *waterhole* (pozo de agua). Alrededor de él, se piensa que podrían estar agrupadas las civilizaciones similares a la nuestra. Como el agua es determinante para el desarrollo de la vida, puede pensarse que esas frecuencias son las más indicadas para las conversaciones a nivel galáctico.

Abajo, la señal emitida por la sonda Pioneer 10, a más de 10.000 millones de km, más allá del sistema solar, recogida por el Phoenix.



Arriba, el disco de 64 m del telescopio Parkes forma parte de la dotación del Phoenix.

MCSA complex amplitude
subband 2695 frame 192
0 dB
left 1 Hz
RF 0 034400.4 Hz
mean pwr = 10000.000000
MCSA superband | SDS 10 MHz | File
MCSA band | SDS 50 kHz | Redraw
MCSA complex | SDS 250 Hz | Print
MCSA waterfall | MCSA all subs | Quit

LA ESTACIÓN ESPACIAL MIR

Hace más de un decenio que la estación rusa MIR está girando alrededor de la Tierra. La «ciudad de las estrellas» hoy está abierta a los astronautas de otros países. Gracias a la MIR, sabemos mucho sobre el comportamiento del organismo humano durante las largas permanencias en el espacio.



Arriba, la MIR refleja la luz del Sol durante la cita con el transbordador Discovery.



Podría parecer muy extraño, pero la estación espacial internacional Alpha, punta de lanza de la investigación astronáutica estadounidense, europea y de otros países occidentales, que terminará alrededor del año 2002, tendrá muchas características tecnológicas rusas. Estas características se han ido desarrollando a lo largo de casi 30 años de investigaciones dedicadas por los soviéticos a las estaciones espaciales ya antes de los años noventa y por los rusos hasta ahora.

UN POCO DE HISTORIA

La historia de la puesta en órbita de las estaciones espaciales, que hace de Rusia el país líder en esta actividad astronáutica, se ha escrito con el desarrollo gradual de instrumentos y materiales ya existentes, sustituciones de nuevos elementos para otras finalidades, rápidas intervenciones en incidentes más o menos graves, continuas y constantes experimentaciones y, recientemente, con la colaboración de estadounidenses y europeos.

La estación espacial MIR es la tercera generación de estaciones espaciales rusas. Sus orígenes han de buscarse en 1971, cuando se construyeron las primeras estaciones espaciales que no podían reequiparse ni reabastecerse, por lo que, después de un cierto tiempo en el espacio, volvían a entrar en la atmósfera y se desintegraban. A finales de los años setenta y principios de los ochenta, se construyeron las Salyut, de cuyo éxito derivó la creación y el crecimiento de la MIR.

La filosofía original del complejo MIR consistía en que pudieran efectuar experimentos tanto los cosmonautas a bordo de la propia estación como los investigadores desde la Tierra. Dicho de otro modo, se quería realizar una estación espacial parcialmente automatizada y en parte «vivida» por los cosmonautas.

Esta estación espacial también ha sido una prueba palpable de que la competición entre los programas espaciales de Estados Unidos y la ex-Unión Soviética también ha tenido una historia de cooperación –esto sí, con menos publicidad– que ha conducido a los resultados que hoy todo el mundo puede ver. La verdadera cooperación a bordo de la MIR nació inmediatamente después de un acuerdo firmado entre los gobiernos de Estados Unidos y Rusia en 1992.

EL MÓDULO PRINCIPAL

El primer bloque que se construyó y se llevó al espacio en febrero de 1986 pesaba 20,4 toneladas. El módulo principal se diseñó para proporcionar los servicios básicos. En él hay una zona en la que los cosmonautas pasan los momentos de relax y de reposo, algunos sistemas de producción de energía y otra parte habilitada para investigaciones científicas.

El módulo principal de la MIR tiene dos sistemas de acoplamiento con otras cápsulas, una delante y otra detrás. A estos sistemas de *docking* (así se denominan técnicamente los sistemas de atraque) pueden atracar, entre otros, las cápsulas Soyuz-TM que transportan tripulaciones, o las cápsulas automatizadas Progress-M, que sirven para enviar comida, instrumental científico y materiales diversos a los cosmonautas que viven a bordo de la MIR.

El área de trabajo es el volumen habitable principal y está constituido por cilindros concéntricos unidos entre sí.

Las diversas tripulaciones han afirmado que en la MIR preferían un sistema de orientación interno: es decir, agradecen la presencia de un pavimento o de un techo, elementos que podrían considerarse irrelevantes en ausencia de gravedad.

El pavimento del área en que trabajan los cosmonautas está pintado de verde oscuro, las paredes de verde claro y el techo de blanco, con lámparas fluorescentes. El área en que los cosmonautas pasan los momentos de reposo o comen también está diseñada de la misma

CÓMO ESTÁ HECHA LA MIR

El primer componente de la MIR se lanzó en 1986; a éste se añadieron sucesivamente otros módulos hasta el punto de que hoy la estación espacial tiene una masa de unas 100 toneladas. Está compuesta de siete módulos que fueron lanzados por separado y ensamblados en el espacio.
Los siete módulos son:
- el módulo principal
- el Kvant 1
- el Kvant 2
- el Kristall
- el Spektr
- el sistema de *docking* (atraque)
- el módulo Priroda

En total, la estación tiene una longitud de unos 32 m y una anchura de 18 metros.

ESTACIÓN ESPACIAL MIR

Soyuz/Progress

Módulo KVANT 1
(1987)

MIR bloque base
(1986)

Módulo KRISTALL
(1990)

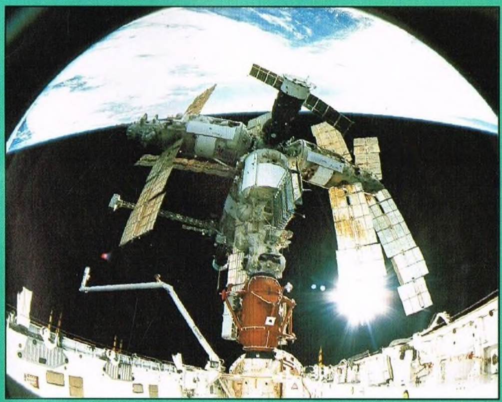
Módulo SPEKTR
(1995)

Módulo KVANT 2
(1989)

Módulo PRIRODA
(1996)

Dirección vuelo

Arriba, este gráfico representa con detalle todo el sistema de la estación espacial MIR.



manera, pero las paredes están pintadas con colores pastel más suaves para dar a esta zona una atmósfera familiar. En esta zona hay una despensa, una mesa, un sistema para preparar las comidas y una alacena para guardar los desperdicios. Una pequeña cabina individual con una ventanilla, un lugar donde sentarse y un saco de dormir se encuentran en la misma área de trabajo. En la parte terminal de esta última hay un lavabo, una ducha y una taza.

KVANT-1: MÓDULO PARA LA ASTROFÍSICA

El módulo Kvant-1 se añadió al módulo principal en 1987. Es de pequeño tamaño y pesa unas 11 toneladas. Contiene sobre todo instrumentos para la investigación astrofísica, además de equipos para

En esta imagen se ve la estación espacial rusa MIR algunos instantes después de haber «enganchado» el transbordador espacial Atlantis estadounidense.



investigaciones sobre la adaptación de las condiciones físicas humanas al espacio. En particular, en su interior se han efectuado investigaciones sobre las galaxias activas, los cuásares y también sobre las estrellas de neutrones. A bordo hay instrumentos que miden los espectros electromagnéticos y las emisiones de rayos X. El módulo está dividido en dos partes: una presurizada y otra no. El compartimento al que acceden los cosmonautas está dividido, a su vez, en dos áreas: una habilitada para los instrumentos y otra en la que pueden trabajar los cosmonautas. En el compartimento no presurizado están los estabilizadores de energía.

Arriba, en una fotografía de la NASA, vemos al Skylab estadounidense con los paneles abiertos, en órbita alrededor de la Tierra.

KVANT-2: MÓDULO CIENTÍFICO Y SISTEMA PARA LA SALIDA AL ESPACIO

El módulo Kvant-2 se acopló a la MIR en 1989 y tiene un sistema que permite a los cosmonautas salir al vacío. Cuenta también con paneles solares y con otro espacio de trabajo. El módulo pesa 19,6 toneladas y está inspirado en un sistema de transporte espacial logístico pensado para la estación espacial Almaz, proyectada en los primeros años setenta.

El Kvant-2 se estructuró para efectuar investigaciones de tipo biológico, estudiar la Tierra y permitir a los cosmonautas salir fácilmente al espacio (técnicamente, este sistema se llama *airlock*). En el Kvant-2 también hay reservas de agua, de oxígeno y otros sistemas auxiliares para la vida en el interior de la estación espacial.

EL MÓDULO KRISTALL

Fue unido a la MIR en 1990, lleva a bordo un equipamiento científico y en su exterior tiene unos paneles solares que pueden extenderse o plegarse según las necesidades. Un importante componente del módulo Kristall es la presencia de un sistema de *docking* radial.

Originalmente, el transbordador ruso Buran debería haberse acoplado a este *docking*. Pero el proyecto Buran se abandonó, lo que hizo que el sistema se adaptara para el acoplamiento de los transbordadores estadounidenses.

EL MÓDULO SPEKTR

Lanzado con un cohete ruso Proton desde Baikonur, Asia central, fue puesto en órbita en 1995. Acoplado a la MIR en la parte opuesta respecto al Kvant-2, el Spektr tiene cuatro paneles solares y equipos científicos, incluidos cerca de 800 kg de material estadounidense. El Spektr se pensó para estudiar sobre todo la Tierra y, en particular, los recursos minerales y la atmósfera.

EL MÓDULO PARA EL DOCKING

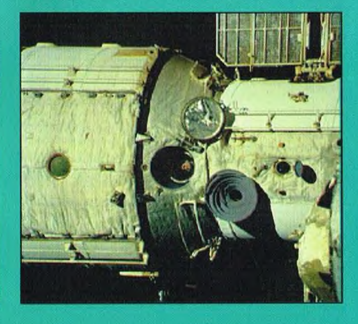
Este módulo se acopló a la MIR durante la misión STS-74 del transbordador estadounidense, en diciembre de 1995. Con este sistema, el acoplamiento de la MIR a un transbordador de EEUU es ahora mucho más sencillo.

Antes de la misión STS-74, el transbordador estadounidense sólo se acopló una vez a la MIR y, para ello, los cosmonautas rusos tuvieron que colocar el módulo Kristall desde una posición radial a una longitudinal respecto a la MIR. Después de la misión STS-71 de junio de 1995, el Kristall se volvió a colocar en su posición original. No es posible dejarlo longitudinalmente porque impide el acoplamiento de los vehículos rusos de reabastecimiento Progress-M y de las cápsulas con carga humana Soyuz-TM.

EL MÓDULO PRIRODA

Es el último módulo que se acopló a la MIR. Se lanzó desde Baikonur el 23 de abril de 1996. Su tarea principal es el estudio científico de la Tierra. En su interior se efectúan experimentos científicos gracias a una colaboración ruso-estadounidense.

Abajo a la derecha, el cosmonauta Valeri Poliakov (en el centro de la imagen) contempla a través de un portillo las operaciones de acoplamiento con el transbordador de la misión STS-63.



ESCUCHAR A LOS COSMONAUTAS RUSOS

Es posible escuchar a los cosmonautas a bordo de la MIR sintonizando las frecuencias siguientes:
145,550 MHz simplex
435,551 MHz uplink/437,975 MHz downlink 435,725 MHz uplink/437,925 MHz downlink

Algunas veces, los cosmonautas utilizan también la siguiente frecuencia:
145,200 MHz uplink/145,800 MHz downlink

Cuando un transbordador está acoplado a la MIR, se emplean también las frecuencias siguientes:
143,625 MHz (VHF-1 de la MIR hacia Moscú)
130,165 MHz (VHF-2 de la MIR al transbordador)
121,166 MHz (del centro de control estadounidense a la MIR)



EN EL PRÓXIMO NÚMERO

EL SISTEMA SOLAR

EL ORIGEN DE LA LUNA

ESTRELLAS Y GALAXIAS

LAS SUPERNOVAS

GUÍA DE LAS CONSTELACIONES

EL LAGARTO

CÓMO FUNCIONA EL UNIVERSO

MEDIR LA VELOCIDAD DE LA LUZ

LA EXPLORACIÓN DEL ESPACIO

SURVEYOR Y LUNIK

EL UNIVERSO

ENCICLOPEDIA DE LA ASTRONOMÍA Y EL ESPACIO

22



9 788439 554219 10022

$ 3,90

PLANETA DeAGOSTINI



COMPOSICIÓN DE LA OBRA

Volumen 1	Fascículos 1	al	16
Volumen 2	Fascículos 17	al	32
Volumen 3	Fascículos 33	al	48
Volumen 4	Fascículos 49	al	64
Volumen 5	Fascículos 65	al	80

VENTA EN QUIOSCOS

Pida a su proveedor habitual que le reserve un ejemplar de EL UNIVERSO. Adquiriéndolo todas las semanas en el mismo punto de venta facilitará la distribución y obtendrá un mejor servicio.
Las tapas correspondientes a cada volumen se ponen a la venta con el fascículo que cierra el tomo. Con dicho fascículo se entregan las portadillas correspondientes.

Presidente: José Manuel Lara
Director General: Carlos Fernández
Director Editorial: Virgilio Ortega
Director General de Producción: Félix García
Coordinador General: Carles Dorico

© Editorial Planeta Argentina S.A.I.C.
Av. Independencia, 1668 - Capital Federal
Servicio de atención al cliente: Tel. (01) 482 - 0655 y 482 - 0657
Distribuye: Capital: Huesca-Sanabria,
Baigorri, 103, Capital Federal,
Interior: D.G.P., Alvarado, 2118, Capital Federal

© Editorial Planeta Mexicana, S.A. de C.V.
Av. Insurgentes Sur # 1162 - México D.F.
Servicio de atención al cliente: Tel. 575 13 48

© Editorial Planeta Colombiana, S.A.
Carrera, 68, n.º 25-55 - Santa Fé de Bogotá, D.C.
Servicio de atención al cliente: Tel. 9800 - 15315

© Editorial Planeta Chilena, S.A.I.C.
Olivares, 1229 - Santiago de Chile

ISBN Obra completa (con vídeo): 84-395-4148-1
Obra completa (sin vídeo): 84-395-4138-4
Fascículos (con vídeo): 84-395-4149-X
Fascículos (sin vídeo): 84-395-4139-2
Depósito legal: B-47.097-1997

Impresión: Cayfosa, Santa Perpètua de Mogoda, Barcelona
Impreso en España - Printed in Spain - Mayo 1998

Los editores se reservan el derecho de modificar el precio de venta de los componentes de la colección en el transcurso de la misma, si las circunstancias así lo exigieran.
Los editores garantizan la publicación de todos los fascículos que componen esta obra.

Fotografías: Lee Gibbons: cubierta, 116-117, 116ab., 117ar.; ESA/SPL: 107c.der.; E.T. Archive: 106ar.; Galaxy Picture Library: 101, 104, tercera de cubiertas; IGDA: 107ar.der.; Science Photo Library/Julian Baum: 106-107; Dr. Jeremy Burgess: 103 der.; Range: 111; Hugh Rowland: 110; Spectrum: 110, 111; US Naval Observatory: 112ar.izq.; Bristock-IFA: 114-115; BNSC/ESA: 118ab.; ESA: 118-119, 119ab., 120c.; Tony Stone Picture Library: 120ab.
Dibujos: Robin Carter/WLAA: 104-105, 117ab.; David A. Hardy: 102-103; Hugh Rowland: 105, 106ab., 120; Katz: 108-109; Sandra Russell/Black Hat: 112ar.; Julian Baum: 113; Farroxs: 116ar.; Robin Bottel: 115ab.; Spectrum Picture Library: 114ab.

EL ORIGEN DE LA LUNA

A pesar de ser el cuerpo celeste más próximo a la Tierra, la Luna sigue siendo misteriosa, especialmente en lo que se refiere a su origen y formación.



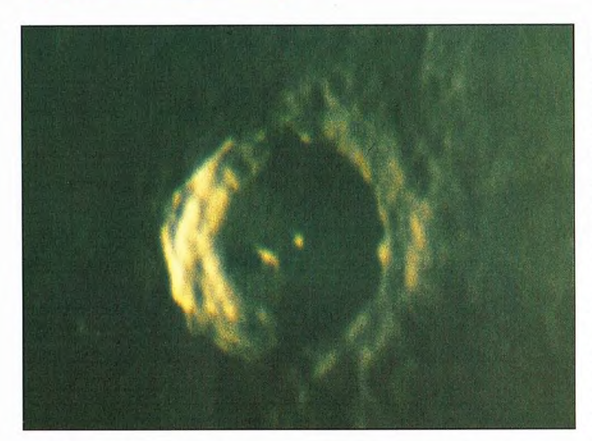
La Luna es el único satélite natural de la Tierra y el cuerpo que más brilla en nuestro firmamento después del Sol. Desde los tiempos más antiguos ha ejercido una gran fascinación sobre la fantasía humana, tanto, que se la llegó a identificar con una divinidad. Probablemente, las observaciones hechas con el telescopio y las misiones espaciales han disminuido la poesía de este cuerpo celeste. Sin embargo, y a pesar de haber sido tan estudiado, todavía tiene algunos aspectos misteriosos, especialmente en lo que se refiere a su origen. En efecto, aún hoy se debate cómo se formó. Antes de exponer las diversas hipótesis elaboradas sobre su origen, describiremos la estructura de este cuerpo celeste para ver las analogías y las diferencias que presenta con el planeta Tierra.

LA ESTRUCTURA SUPERFICIAL

Incluso a simple vista, es posible distinguir las características peculiares de la superficie lunar: no se nos muestra como un disco uniforme, sino constelado de zonas claras (llamadas continentes o altiplanos) y regiones más oscuras (los mares lunares). También hay cráteres (cerca de un millón) de las dimensiones más diversas, con diámetros que van desde algunos centímetros hasta centenares de kilómetros.

Los mares son zonas planas y bastante uniformes que cubren aproximadamente un tercio de la superficie lunar visible desde la Tierra. Están formados principalmente por rocas cuyo origen son lavas. En cambio, los continentes presentan un aspecto más complejo y entrecortado. Ocupan las dos terceras partes del hemisferio visible y la casi totalidad del oculto. En las zonas continentales abundan los cráteres de grandes dimensiones, 10 veces más numerosos que en los mares. Se ha comprobado que estos cráteres son producto del impacto de meteoritos; por tanto, no serían de origen volcánico, como se pensaba antes de las misiones espaciales lunares. En la superficie de nuestro satélite también están presentes otras estructuras menores, como los radios que parten de los grandes cráteres. Son de color claro, y los

En la imagen, el LEM se aproxima a la cápsula que orbita alrededor de la Luna (en primer plano). Al fondo, la Tierra.

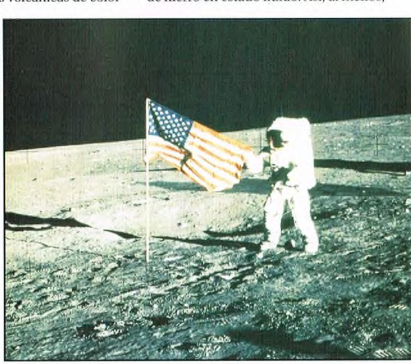


Arriba, los grandes cráteres lunares son el producto de impactos de meteoritos. Las colisiones más frecuentes ocurrieron en una época comprendida entre los 4.600 y 3.900 millones de años, después de la consolidación de la corteza de anortosita y antes de la formación de los mares basálticos por efecto de la emisión de lavas sobre la corteza superficial.

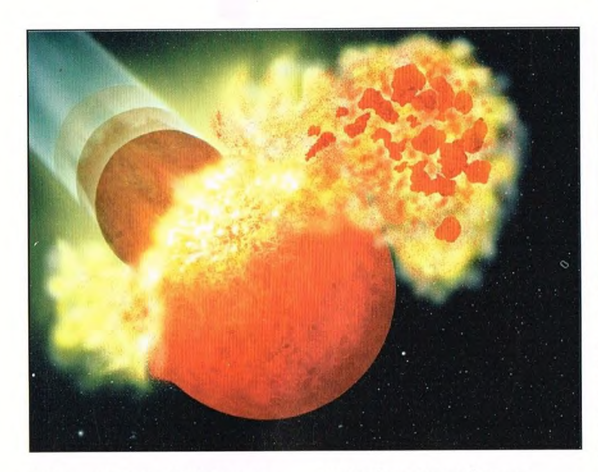
más brillantes se ven incluso desde la Tierra. Se deben a la proyección a distancia de material de la superficie de la Luna después del impacto de los meteoritos. Las misiones espaciales que se sucedieron sobre el suelo lunar fueron fundamentales para la comprensión de la estructura superficial e interna del satélite y para el estudio del proceso de su formación. Toda la superficie lunar aparece cubierta por un suelo muy especial (regolito) constituido por polvo y residuos, restos del bombardeo y de la rotura de la superficie provocada por los meteoritos. El suelo se ha mantenido inalterado a causa de la ausencia de erosión por parte de agentes atmosféricos. Por otra parte, la falta de atmósfera hace que los meteoritos no se desintegren, como ocurre cuando atraviesan la atmósfera terrestre, sino que lleguen íntegros a la superficie de nuestro satélite, produciendo cráteres que son los testigos de colisiones antiquísimas. La caída de un meteorito, además de abrir un cráter, da lugar a modificaciones en las rocas que forman la superficie afectada por el impacto. La energía que se libera en el choque determina la fusión de las rocas de la parte inferior, que se desparraman por la zona adyacente a la de la explosión. Estas rocas, al enfriarse, se solidifican en pequeñas esferas vitrificadas. A una distancia mayor del lugar de impacto, las rocas no se funden, pero se modifican: la colisión provoca la compresión y la cementación de materiales diversos hasta formar unas rocas heterogéneas llamadas brechas. Finalmente, el choque puede romper las rocas de la región circundante sin modificar su composición.

LA COMPOSICIÓN DE LAS ROCAS

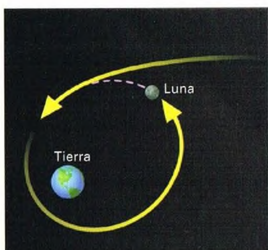
Las misiones lunares trajeron a la Tierra muestras de brecha. Después de analizarlas, se vio que las rocas que forman la superficie de la Luna son esencialmente de tres tipos: los basaltos, las rocas llamadas KREEP y las anortositas. Los basaltos, que forman los mares lunares, son rocas volcánicas de color oscuro. Las KREEP se llaman así a causa del alto contenido en potasio (símbolo químico: K), en tierras raras (del inglés *Rare Earth Elements*, REE) y de fósforo (símbolo químico: P). Las anortositas son raras en la Tierra; su color es claro, tienen una densidad baja y son ricas en calcio; forman, sobre todo, los altiplanos lunares. Se cree que toda la corteza de la Luna está formada por anortositas. El análisis químico de las muestras rocosas mostró que la Luna está compuesta por los mismos elementos que la Tierra, pero en proporciones diferentes. En realidad, la Luna es mucho más rica en elementos refractarios, es decir, materiales cuya temperatura de fusión es elevada; por ejemplo, el calcio y el titanio. En cambio, es más pobre en elementos químicos volátiles, es decir, elementos cuya temperatura de evaporación es baja. Estas diferencias con la Tierra han de tenerse en cuenta cuando se formulan hipótesis sobre el origen de nuestro satélite. Además de tomar muestras de la superficie, los astronautas también instalaron sismógrafos capaces de registrar la actividad sísmica, tanto la natural como la producida artificialmente con finalidades de estudio; por ejemplo, la caída sobre el suelo lunar de fragmentos de satélites. Gracias a estos instrumentos se ha podido conocer la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en nuestro satélite y su estructura interna, ya que las ondas sísmicas se propagan más rápidamente a través de estratos de roca de densidad mayor. Se considera que la corteza lunar está formada por anortositas y que se extiende desde la superficie hasta unos 60 km de profundidad. Por debajo de este valor habría una región, llamada manto, formada por rocas más densas que la corteza. En cambio, se sabe poco de la composición de las capas más profundas. Sin embargo, parece que la Luna, a diferencia de la Tierra, carece de un núcleo de hierro en estado fluido. Así, al menos,



A la derecha, la Luna es el único cuerpo extraterrestre sobre el cual el hombre ha puesto el pie. El primer alunizaje tuvo lugar el 20 de julio de 1969 y el último, en diciembre de 1972. En verano de 1994, la cápsula Clementine efectuó una extensa cartografía de la superficie lunar.



Arriba, una colisión con otro objeto celeste podría haber causado la fisión de la prototierra. De las dos partes, una habría dado origen a la Tierra; la otra, a la Luna (hipótesis de la fisión).



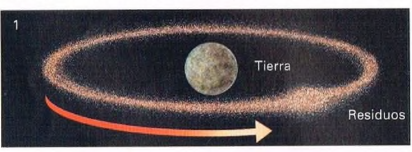
Arriba, puede pensarse en la Luna como en un objeto que se hubiera formado en una región del sistema solar muy alejada de la Tierra y que, durante su movimiento, hubiese sido capturado por el campo gravitatorio terrestre y forzado a orbitar alrededor de nuestro planeta. Pero la aproximación a la Tierra de un cuerpo de las dimensiones de la Luna habría provocado unos considerables efectos de marea, tan notables que hubieran dejado una señal tangible en la superficie de nuestro planeta, señal que no ha sido hallada en la Tierra.

parece sugerirlo tanto la baja densidad media de la Luna (aproximadamente 3,3 g/cm³) respecto a la de la Tierra (aproximadamente 5,5 g/cm³) como la ausencia de un campo magnético lunar. Es el movimiento del hierro del núcleo el que produce el campo magnético terrestre. Podría decirse que la Tierra es un gran imán con dos polos localizados en los polos Norte y Sur geográficos. Esto permite pensar que el campo magnético es producto de los movimientos del hierro líquido que hay en el núcleo del planeta. Se sabe también que una corriente eléctrica produce un campo magnético. Como el hierro en estado líquido es un conductor óptimo, al moverse en el interior del núcleo terrestre crea unas corrientes eléctricas; a su vez, éstas son las responsables de la formación del campo magnético que mueve la aguja de nuestras brújulas. La Luna no posee actualmente un campo de este tipo, de lo cual se deduce la ausencia de un núcleo ferroso.



LAS ETAPAS DE LA FORMACIÓN

En el pasado, la Luna debía tener un campo magnético muy intenso, ya que todas las rocas lunares presentan un magnetismo residual, una especie de testimonio fósil de que, en la época de su formación, sí debía ejercer un magnetismo, y de una intensidad notable. Qué fue lo que originó este campo magnético es, todavía hoy, un problema no resuelto. Gracias a los estudios efectuados para conocer la edad de las muestras lunares, se ha llegado a la conclusión de que los mares son formaciones geológicas más jóvenes que los altiplanos. Esta conclusión ha sido posible después de considerar el hecho de que los cráteres de mayores dimensiones, debidos a los impactos más violentos, se encuentran esencialmente en las regiones ocupadas por los altiplanos, mientras que en los mares apenas aparecen. Esto indica que los mares se formaron en un período posterior a la fase en la que los choques con los grandes meteoritos eran más frecuentes. Después de esta fase de lluvia intensa de meteoritos (hace unos 4.000 millones de años) siguió otra de evacuación de las lavas del manto a través de la superficie lunar. Estas coladas llenaron las amplias hondonadas provocadas por el impacto de los meteoritos. La lava, al solidificarse, formó los mares lunares actuales. Posteriormente, tuvieron lugar otros impactos meteoríticos, aunque de menor intensidad y en número mucho menos considerable. También en los mares



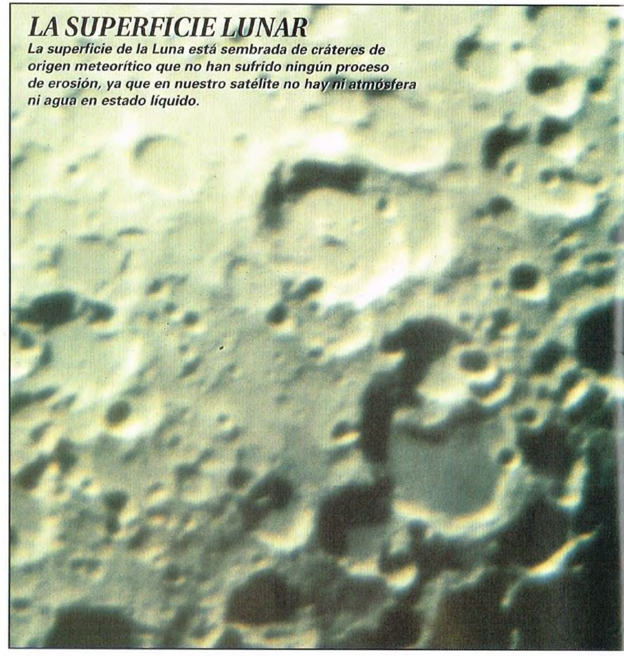




En las tres figuras se ilustra la hipótesis de la acreción, según la cual la Luna se habría formado separadamente de la Tierra, a partir de la progresiva agregación de fragmentos que orbitaban desde los orígenes alrededor de nuestro planeta.

CRÁTERES LUNARES

Ya a simple vista, la observación de la superficie lunar permite identificar algunas de sus principales características morfológicas; por ejemplo, los cráteres debidos a impactos de antiguos meteoritos. Son de dimensiones diversas: entre los mayores, está el cráter en forma de anillo llamado Copérnico, que mide 93 km de diámetro y 3.760 m de profundidad. En la Luna también es fácil reconocer formaciones morfológicas constituidas por grietas estrechas y profundas, como, por ejemplo, las que hay en las proximidades del cráter Triesnecker.



LA SUPERFICIE LUNAR

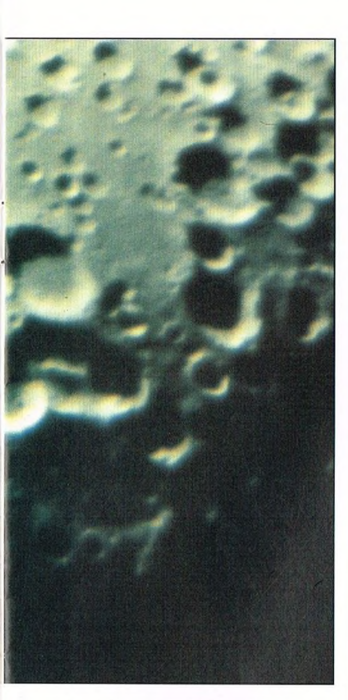
La superficie de la Luna está sembrada de cráteres de origen meteorítico que no han sufrido ningún proceso de erosión, ya que en nuestro satélite no hay ni atmósfera ni agua en estado líquido.

se observan algunos cráteres, pero no de las dimensiones que alcanzan los que hay en los altiplanos. El cuerpo celeste que habría de formar la Luna pasó por una serie de transformaciones que se pueden resumir en las fases siguientes: enfriamiento progresivo de la región superficial y formación de la corteza; bombardeo por grandes meteoritos; época de intensa actividad volcánica y formación de los mares lunares; fin de la actividad volcánica y época actual. Aunque esta serie de acontecimientos externos e internos ha caracterizado la historia de la Luna a partir de su nacimiento, todavía se sabe muy poco acerca del origen de nuestro satélite: ¿se formó la Luna a partir de una porción de la Tierra, o bien tuvo un origen distinto que nuestro planeta?



A este respecto se han propuesto tres hipótesis. Generalmente, se habla de captura, de fisión y de acreción. Según la primera, la de captura, la Luna se habría formado en otra región del sistema solar, lejos de la Tierra, y posteriormente habría sido capturada por ésta en su campo gravitatorio. Esta hipótesis explicaría la diferente composición química de la superficie de ambos cuerpos celestes: la Luna sería distinta porque se habría formado en otro lugar, en una zona del sistema solar pobre en elementos volátiles y rica en elementos refractarios. Sin embargo, la captura parece ser un proceso bastante improbable desde el punto de vista dinámico. Si un cuerpo como la Luna pasase cerca de la Tierra, difícilmente sería capturado por ella; lo más probable es que sufriera una desviación de su propia trayectoria a causa del campo gravitatorio

Imagen del disco lunar completo, tomada por el Apolo 17. Se ven perfectamente algunos mares (las manchas más oscuras).



En esta imagen, tomada por un aficionado, aparecen algunos de los cráteres lunares.

terrestre. Según la hipótesis de la fisión, en cambio, la Luna sería hija de la Tierra, es decir, ambas provendrían de un único cuerpo originario, llamado prototierra, que se habría separado en dos partes. Sin embargo, no está claro por qué la prototierra habría quedado sujeta a una inestabilidad dinámica tal que provocase la fisión. En esta hipótesis, las diferencias de composición las explicaría el hecho de que la Luna habría estado formada por materia procedente del manto y de las regiones superficiales de la Tierra.

Una variante de la hipótesis de la fisión es la siguiente: la masa que dio origen a la Luna se habría separado de la Tierra no a causa de una inestabilidad intrínseca, sino por efecto de un agente externo, como una violenta colisión con otro cuerpo bastante grande, aproximadamente igual a la décima parte de la masa de la Tierra (por ejemplo, el planeta Marte). Un choque así habría esparcido por la órbita terrestre material procedente de nuestro planeta; luego, los fragmentos de este material se habrían unido para dar origen a la Luna.

En el tercer supuesto, el de la acreción, la Luna sería una compañera de la Tierra que, aunque nacida por separado, habría crecido junto a ella. Se habría formado a partir de fragmentos situados en órbita alrededor de la Tierra. Esta hipótesis no explica las diferencias de composición de ambos cuerpos, porque, en este caso, ambos se habrían originado a partir de un mismo

Arriba, en este dibujo se representan las diversas fases de la hipotética fisión de la Luna desde una Tierra todavía fluida.

material primordial. Sin embargo, podría adquirir verosimilitud considerando que, por cualquier motivo –en realidad, poco claro–, la materia más rica en hierro habría formado la Tierra y no la Luna. Actualmente, no existen pruebas definitivas a favor de una u otra hipótesis. Pero, de todas ellas, parece que la de la captura es la menos probable, sobre todo por razones dinámicas.

LAS SUPERNOVAS

Observadas desde la Antigüedad con interés y estupor, las supernovas son estrellas que, al explotar, aumentan súbitamente su luminosidad de manera espectacular.



Es natural que, en la psicología de un astrónomo, una estrella vaya asociada a un ser humano. En efecto, lo mismo que el hombre, las estrellas nacen, crecen, viven y, finalmente, mueren. Como en el hombre, la muerte puede sobrevenir de una manera natural o ser de naturaleza violenta y dramática. Esto es lo que ocurre en unas estrellas muy masivas que terminan su existencia con explosiones espectaculares: las supernovas.

AGREGADOS DE MATERIA INTERESTELAR

Observando atentamente con el telescopio un campo estelar muy poblado, es posible ver extensas estructuras de formas espectaculares y colores muy variados, que enriquecen la belleza del cielo como enormes flores en un prado cósmico. Estas estructuras forman parte de la amplia categoría de las nebulosas, o sea, agregados de materia interestelar (polvo y gases) que se mantienen juntos por autogravedad. La formación de algunas de estas nebulosas es bastante reciente, y son los inmensos restos cósmicos de explosiones grandiosas ocurridas en nuestra Galaxia y en otras. Estos fenómenos se conocen con el nombre de supernovas, secuela de la terminología latina utilizada siglos atrás por los astrónomos occidentales, ya que era convicción general que estos acontecimientos espectaculares estaban en cierto modo ligados al nacimiento de una nueva –*nova*– estrella, convicción, como veremos más adelante, destinada a ser invalidada en los siglos siguientes. A su vez, los restos gaseosos dejados por estas gigantescas explosiones se llaman restos de supernovas.

AFICIONADOS Y SUPERNOVAS

Precisamente porque se trata de objetos muy brillantes y, por tanto, fácilmente observables incluso con telescopios pequeños, las supernovas son algunos de los objetos preferidos por los astrónomos aficionados. Por otra parte, la «caza» de supernovas exige una dedicación constante y paciente, cualidad de la que, muchas veces, los aficionados están más dotados que los astrónomos profesionales. En cualquier caso, la colaboración de los aficionados ha demostrado ser fundamental. A partir de 1990, al menos unas 50 supernovas han sido descubiertas anualmente por astrónomos aficionados de todo el mundo. Un claro ejemplo de que, en algunos casos, la gran ciencia no está reservada a los profesionales.

EL DESCUBRIMIENTO DE LAS SUPERNOVAS

A pesar de que su naturaleza ha permanecido ignorada por los astrónomos durante muchos siglos, las supernovas han sido algunos de los cuerpos celestes más observados desde épocas remotas. En efecto, muchas de ellas son tan brillantes que pueden verse fácilmente incluso a simple vista y, en determinados casos, incluso a pleno día.

Las primeras observaciones de las que tenemos constancia oficial en las crónicas de la Antigüedad se remontan al año 185 d.C. En los siglos siguientes, los acontecimientos de este tipo fueron observados con cierta regularidad y, cada vez, su existencia era anotada de forma escrupulosa por los astrónomos de la época y transmitida a las generaciones futuras. En la Antigüedad, el estudio del cielo tenía una enorme importancia para la compilación de los horóscopos. A los astrónomos que prestaban servicios en las cortes de los emperadores de la antigua China debemos el registro de muchas de las supernovas que se descubrieron en un pasado remoto.



Arriba, la nebulosa del Cangrejo, así llamada por su forma característica, que recuerda, precisamente, la de este animal, representa uno de los restos más famosos de supernova. Se encuentra a más de 6.000 años luz de la Tierra, en la constelación de Tauro y, por tanto, es visible desde ambos hemisferios. La explosión de esta supernova ocurrió en el año 1054 d.C. y fue registrada por astrónomos chinos. Curiosamente, y a pesar de que el fenómeno no pudo escapar ni al observador más distraído, no existen noticias de este acontecimiento en las crónicas occidentales de la época.



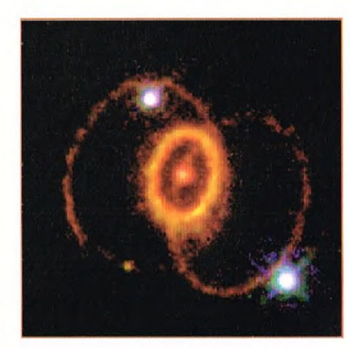
LAS PRIMERAS OBSERVACIONES EN OCCIDENTE

Entre las supernovas observadas por los chinos, merece mención especial la supernova del Cangrejo (1054 d.C.), situada dentro de la constelación de Tauro, y denominada así a causa de su forma característica. En cambio, las observaciones sistemáticas de supernovas por parte de los astrónomos occidentales empezaron con un notable retraso. Sólo hacia mediados del siglo XVI las crónicas científicas empezaron a registrar el fenómeno. Esta negligencia voluntaria era consecuencia de la visión aristotélica del universo que, en aquella época, todavía dominaba el pensamiento occidental y según la cual los cielos eran eternos e inmutables. Por esto, fenómenos como las supernovas, que perturbaban de forma tan espectacular la tranquilidad del cielo, encajaban mal en el orden natural de las cosas. Las primeras observaciones de supernovas por parte de astrónomos europeos datan de 1572 y de 1604 y se deben a Tycho Brahe y Johannes Kepler. Todavía hoy vemos restos homónimos de las supernovas de Tycho y de Kepler. Esta última, especialmente, es también la última supernova galáctica que se ha observado a simple vista. Fue necesario llegar a 1885 para que el astrónomo E. Hartwig descubriera la primera supernova extragaláctica, concretamente en la galaxia de Andrómeda (M31). El flujo luminoso emitido por esta supernova era tal que resultaba visible incluso a la distancia de Andrómeda, es decir, a 2 millones de años luz. Según algunas estimaciones efectuadas en los años veinte por Edwin Hubble, su luminosidad era igual a una sexta parte de la luminosidad de la galaxia de Andrómeda. Desde entonces, y gracias al empleo astronómico de las placas fotográficas, el descubrimiento de supernovas se ha sucedido con una frecuencia cada vez mayor. Actualmente, las que se han identificado se acercan al millar. Buscar supernovas es una actividad que requiere una observación paciente y constante del cielo para tratar de identificar un acontecimiento que, por ser muy brillante, es fácilmente detectable, pero que tiene lugar de una manera inesperada. El círculo de los

LA EDAD DE LOS RESTOS DE UNA SUPERNOVA

La edad de un resto de supernova se determina de forma automática siempre que se conozca la fecha en que tuvo lugar el acontecimiento que la generó. En los demás casos, obtener estimaciones fiables resulta más complicado. En las situaciones en las que un resto de supernova alberga un púlsar, es posible remontarse a la edad de ambos midiendo su período de pulsación y su variación en el tiempo. En el resto de los casos, hay que basarse en comparaciones con restos de supernova de edad conocida.

Arriba, otro resto de supernova muy famoso es el de la Vela. La explosión tuvo lugar hace unos 10.000 años. Toma el nombre de la constelación que lo alberga, llamada de la Vela, visible desde el hemisferio austral. La nebulosa se halla a una distancia de 1.500 años luz de la Tierra y, al igual que la del Cangrejo, también alberga un púlsar.



A la izquierda, la forma de un resto de supernova depende en gran medida de la dinámica de la explosión. Esto se ve claramente en la supernova que muestra la imagen, tomada por el telescopio espacial Hubble. Se trata de la SN1987A, que explosionó en 1987 en la Gran Nube de Magallanes, una galaxia satélite de la Vía Láctea, a una distancia de 150.000 años luz. Probablemente, los anillos tienen su origen en chorros de materia emitidos por la estrella antes de la explosión, una especie de «último suspiro» exhalado por la estrella moribunda.

cazadores de supernovas es bastante restringido: son poco más de 10 los astrónomos que pueden vanagloriarse de haber descubierto más de 20 supernovas en su vida. El primer lugar en esta curiosa clasificación corresponde, con buena ventaja, al astrónomo Fritz Zwicky que, a partir de 1936, consiguió identificar 123 de estos acontecimientos.

QUÉ SON LAS SUPERNOVAS

Las supernovas son unos sucesos catastróficos que representan el acto final en la evolución de estrellas de gran masa, gigantes o supergigantes. Durante estas violentas explosiones, en pocos segundos se libera una cantidad de energía del orden de 10^{51} ergs, es decir, un flujo de energía comparable al que ha emitido la misma estrella a lo largo de toda su vida. Los mecanismos que provocan estas explosiones son varios, según que la estrella moribunda pertenezca a un sistema binario o esté aislada. En el primer caso, la explosión de supernova solamente tiene lugar si la estrella compañera es una enana blanca. Las enanas blancas son estrellas de masa solar nuclearmente inactivas que, una vez llegadas al término de su existencia, se contraen hasta reducirse a las dimensiones de un planeta. En ciertas condiciones críticas, la enana blanca interactúa gravitatoriamente con su compañera, absorbiendo materia de sus capas superficiales. La materia capturada, al caer sobre la enana blanca, se calienta y provoca unas reacciones nucleares incontrolables que acaban destruyendo la enana y también la otra estrella del sistema binario.

En cambio, en el segundo caso, es la propia estrella la que explosiona. Como es sabido, la vida de una estrella cualquiera está determinada por un frágil equilibrio entre la presión gravitatoria centrípeta de la materia que la forma y la presión centrífuga de la radiación producida por las reacciones nucleares que se desarrollan en su interior. Después de haber pasado por todos los ciclos posibles de fusión nuclear, este delicado equilibrio se rompe. En tales condiciones, la presión gravitatoria tiene ventaja, y la estrella empieza a contraerse rápidamente. El calentamiento súbito que sigue provoca en el núcleo de la estrella unas reacciones nucleares incontrolables que liberan energía de manera explosiva, con la consiguiente destrucción de la estrella misma.

LAS ESTRELLAS DE NEUTRONES

Los restos de supernovas no son simplemente cúmulos gaseosos, sino que, a manera de inmensas ostras cósmicas, pueden esconder objetos muy fascinantes. Siguiendo esta analogía, las perlas serían las estrellas de neutrones, que representan todo lo que queda del núcleo de la estrella que explosionó. Mientras que, después de la explosión de una supernova, las capas más externas de la estrella son arrojadas al espacio, su núcleo se repliega sobre sí mismo formando un resto estelar superdenso: esto es precisamente una estrella de neutrones. Tales circunstancias hacen que la estrella de neutrones acelere su propio movimiento de rotación sobre sí misma hasta girar con períodos de unas pocas decenas de milisegundos y emitir pulsaciones electromagnéticas.

De este modo, se hace visible como púlsar. Además, a consecuencia de la violenta sacudida originada por



A la derecha, Eta Carinae *es una de las estrellas más misteriosas del firmamento. Hace 150 años se hizo súbitamente muy luminosa para, luego, debilitarse de nuevo. Hoy, el Hubble ha revelado su increíble estructura. Los astrónomos piensan que podría tratarse de una estrella a punto de explosionar como supernova.*

la explosión, el púlsar es lanzado al espacio a velocidades del orden de algunos centenares de kilómetros por segundo, lo que hace que se aleje cada vez más de su lugar de origen.

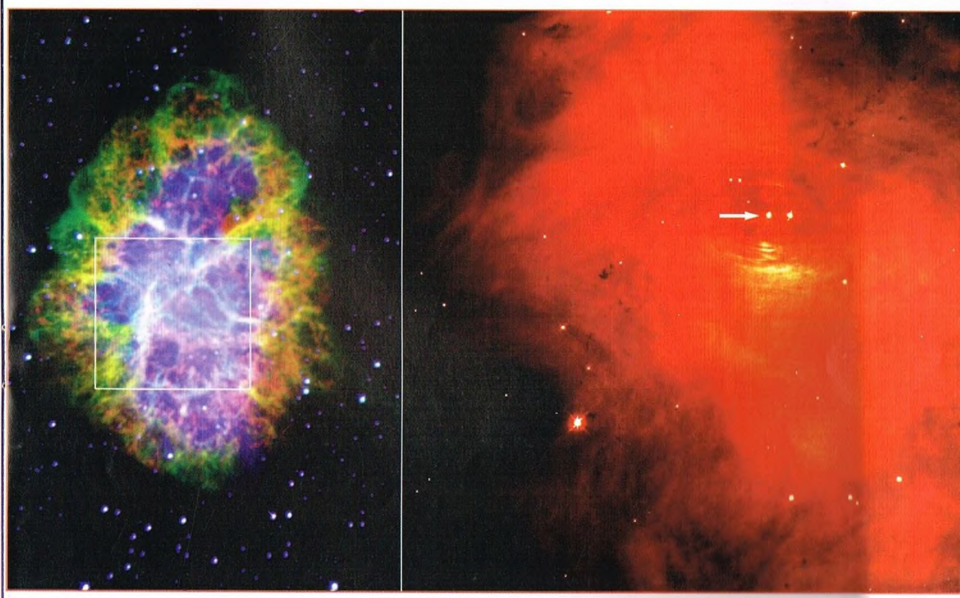
NUBES DE GAS EN EXPANSIÓN

La explosión de supernova deja tras de sí una nube de gas en expansión –el resto de supernova–, que es todo lo que queda de las capas superficiales de la estrella después de haber explosionado. El estudio espectroscópico de estas nubes es fundamental para la física estelar porque permite llegar hasta la composición de la estrella destruida y, por tanto, reconstruir su evolución. La morfología de los restos de supernova es muy variada. En general, depende de las condiciones en que tuvo lugar la explosión de la estrella progenitora y, por tanto, de sus características intrínsecas. Además, la expansión de la nube no es igual en todas las direcciones a causa de la interacción con el gas interestelar, que puede modificar la forma en tiempos de escala del orden de millares de años. Así, pues, el estudio morfológico de los restos de supernova es importante porque permite estimar la densidad local del medio interestelar.

LOS NEUTRINOS

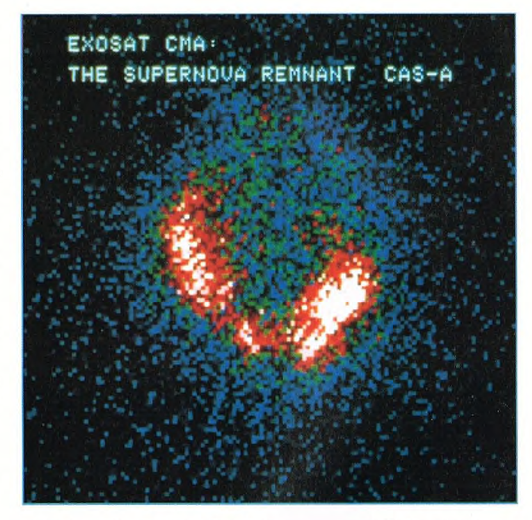
Durante un acontecimiento de supernova, la energía de la explosión es irradiada al espacio principalmente en forma de radiación electromagnética. Además, una parte de la energía total es transportada por enjambres de partículas, los neutrinos, procedentes del núcleo de la estrella que explosionó. Los neutrinos son unas partículas elementales que se forman en el interior de la estrella como productos secundarios de las reacciones de fusión nuclear. Poseen una masa extremadamente pequeña, miles de veces inferior a la del electrón, y se mueven en el espacio a la velocidad de la luz. La característica fundamental de los neutrinos es que interactúan de manera casi nula con la materia que los rodea. Esta propiedad les permite atravesar los espacios interestelares sin ser absorbidos por ningún obstáculo. Por tanto, detectar la presencia de neutrinos procedentes del espacio es una tarea muy difícil. Apenas los astrónomos descubren una supernova razonablemente próxima para que pueda medirse su flujo, los astrofísicos y los físicos nucleares se lanzan a la búsqueda de los neutrinos emitidos por la explosión. En el mejor de los casos, sin embargo, las detecciones diarias no superan unas pocas unidades. Pero, aunque esta búsqueda es, por muchos motivos, frustrante, disponer de una estimación del número de neutrinos existentes es fundamental para la cosmología; y a pesar de que su masa es muy pequeña, llenan prácticamente todo el universo y, por tanto, representan una aportación nada despreciable a su masa efectiva. Como es bien sabido, conseguir estimar con cierta precisión la masa del universo es fundamental para prever su destino.

Abajo a la izquierda, una imagen de la nebulosa del Cangrejo tomada desde tierra con un telescopio. Este resto de supernova explosionó hace más de 900 años; tiene un diámetro de unos 10 años luz. Abajo, en este detalle de la parte central de la nebulosa del Cangrejo, tomado con el telescopio espacial Hubble, es visible el púlsar, marcado con la flecha. A su alrededor, se observan las características estructuras irregulares que se modifican con el tiempo.



CARACTERÍSTICAS DE LAS SUPERNOVAS

Las supernovas son un ejemplo especial de estrellas variables en las que la variación de luminosidad observada tiene un carácter único, ya que coincide con la destrucción de la estrella misma. Por consiguiente, y lo mismo que todas las estrellas variables, las supernovas se caracterizan también por su curva de luz, es decir, el diagrama que reproduce la evolución de la luminosidad de la estrella en función del tiempo. Aunque las curvas de luz de las supernovas pueden mostrar diferencias significativas, en algunos casos se dan también rasgos familiares fácilmente reconocibles. En primer lugar, una curva de luz típica se caracteriza por un rápido incremento de la luminosidad, que dura algunos días hasta que llega a un valor máximo. Por esto, la supernova se mantiene en su máxima intensidad luminosa durante unos 10 días. Después, empieza a disminuir de manera discontinua para luego decaer de manera casi regular. Interpretando correctamente la curva de luz de una supernova es posible llegar hasta la dinámica de la explosión y estudiar su evolución. La parte de la curva de luz que va desde el ascenso inicial hasta el máximo de luminosidad corresponde a la explosión de la estrella, mientras que la disminución que sigue corresponde a la expansión y al enfriamiento del manto gaseoso originado por la explosión de la estrella. Naturalmente, este descenso de luminosidad es más rápido cuanto más rápida es la expansión del resto de supernova.



Arriba, la supernova* Cassiopea-*A vista desde el satélite EXOSAT, en una imagen de la Agencia Espacial Europea (ESA).

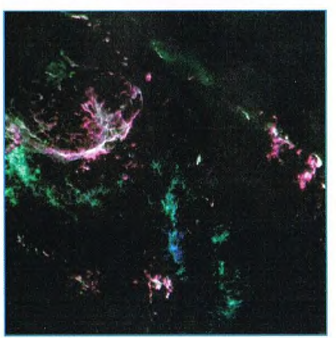
CLASIFICACIÓN DE LAS SUPERNOVAS

En las supernovas se distinguen dos familias principales llamadas de Tipo I y de Tipo II. Las supernovas de Tipo I (SNI) están producidas por estrellas bastante viejas que forman parte de sistemas binarios (compuestos por dos estrellas que orbitan una alrededor de otra) en los que el segundo miembro es una enana blanca. Además, sus curvas de luz tienen un comportamiento muy parecido, y presentan un aumento rápido, seguido por un descenso de unas tres magnitudes a lo largo del mes siguiente. Se dividen, a su vez, en varios subtipos.

Las SNIa son las más luminosas, con una magnitud absoluta de, aproximadamente, –19, lo que hace que sean las más fáciles de detectar. Las SNIa se observan en galaxias de cualquier tipo morfológico. Las SNIb se encuentran preferentemente en las galaxias espirales y son menos luminosas: aproximadamente 1,5 magnitudes respecto a las SNIa. Las SNIc forman una subclase de las SNIb y se distinguen por las diferentes características de su espectro de emisión.

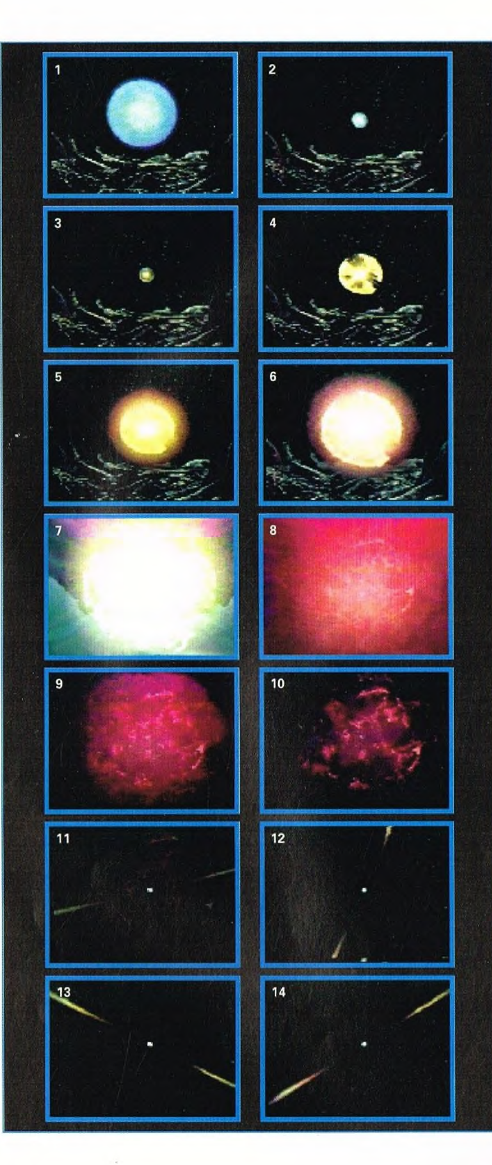
Por el contrario, las supernovas de Tipo II (SNII) se forman a partir de estrellas jóvenes con masas del orden de una decena de masas solares, y aparecen con más regularidad en las galaxias espirales e irregulares. Las supernovas de Tipo II son también menos luminosas (magnitud absoluta = –16,5), y las formas de la curva de luz varían de manera significativa según los casos. De acuerdo con las características de las curvas de luz, también se dividen en varios subtipos:





A la izquierda, una de las últimas imágenes de la supernova 1994I en las regiones internas de la galaxia M51, a 20 millones de años luz, en la constelación de los Perros de Caza.

Al lado, en esta imagen de la NASA, tomada con el telescopio espacial Hubble, se ven los restos de una estrella que explosionó hace 3.000 años como supernova. Este resto de supernova, llamado N132D, se halla a 169.000 años luz de la Tierra, en la Gran Nube de Magallanes.



• SNII-L: la curva de luz se caracteriza por una disminución de la luminosidad constante después del máximo.

• SNII-P: la curva de luz se estabiliza al cabo de unos 30 días del máximo, y permanece así durante otros 50 días para volver a disminuir de manera constante.

• SNIIn: pertenecen a esta familia las que muestran una disminución más lenta de la luminosidad.

• SNIIb: representan una especie de híbrido entre las SNIb y las SNII.

• SNIII, SNIV, SNV son supernovas que tienen otras características peculiares.

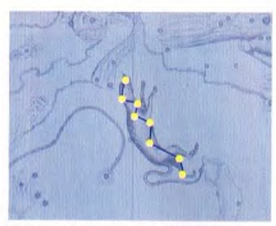
LA SN1987A

Una de las supernovas más interesantes que se han observado en los últimos años es la SNI1987A, que explosionó en marzo de 1987 dentro de la Gran Nube de Magallanes, a una distancia aproximada de 50 kpc. Las primeras observaciones ópticas de la SN1987A revelaron la forma inusual del resto de supernova. El manto gaseoso formado a causa de la explosión aparecía dominado por la presencia de una estructura elíptica brillante y por dos círculos más amplios y más débiles dispuestos a los lados de la elipse. En un plazo muy breve, se efectuaron observaciones sucesivas de la SN1987A con el Hubble que acababa de ponerse en órbita. Estas observaciones, realizadas con el instrumento FOC *(Faint Object Camera)*, permitieron determinar que la estructura más interna era un anillo de materia en expansión, y que su forma elíptica se debía sólo a un efecto de perspectiva causado por su inclinación del orden de 45° respecto a la visual. Por otra parte, la aberración esférica que en aquellos momentos afectaba los sistemas ópticos del Hubble no permitía efectuar observaciones más precisas, que hubieran podido esclarecer la naturaleza de los dos anillos más externos. Para desvelar el misterio de aquella estructura tan peculiar de la SN1987A fue necesario esperar a que finalizara la misión de reparación del telescopio. Las primeras observaciones llevadas a cabo con el Hubble reparado permitieron estudiar la estructura de los anillos con una resolución angular sin precedentes y recoger detalles a escalas de 5 centésimas de segundo de arco. Esto hizo posible observar el alineamiento entre los dos anillos más externos y el más interno. Observaciones más recientes, también con el Hubble y utilizando, además de la FOC, la WFPC2 *(Wide Field Planetary Camera 2)* y el espectrógrafo FOS *(Faint Object Spectrograph)* permitieron desvelar la naturaleza de la materia que constituye los anillos. De estas observaciones parece deducirse que las condiciones físicas en el interior de los anillos más externos son muy parecidas. Especialmente, las abundancias relativas de carbono-nitrógeno-oxígeno podrían indicar que el material que compone los anillos más externos fue eyectado por la estrella progenitora de la supernova durante fases evolutivas anteriores, unos 10.000 años antes respecto a los anillos más internos.

Desde la izquierda y de arriba abajo, una secuencia que muestra las diversas fases de la explosión de una supernova de Tipo II, hasta la formación del púlsar.

EL LAGARTO

La débil constelación del Lagarto cubre una pequeña zona del firmamento entre Andrómeda y el Cisne.



Arriba, la constelación del Lagarto fue introducida en el siglo XVII para llenar una zona celeste carente de constelaciones, entre el Cisne y Andrómeda.



Fue Johannes Hevelius quien introdujo el Lagarto en 1687. Lo mismo que la constelación de la Jirafa, no contiene estrellas muy luminosas, pero sus astros, a pesar de ser débiles, debieron sugerir a Hevelius la forma del reptil a causa de su disposición en zig-zag en la bóveda celeste, una disposición que recuerda el movimiento de un lagarto.

CÓMO LOCALIZAR LA CONSTELACIÓN

La constelación se encuentra a unos 20º al este, es decir, a la izquierda del observador dando la espalda al norte, respecto a Deneb, la estrella que identifica la cola del Cisne. Si imaginamos el cuerpo del Lagarto dibujado por las estrellas, lo veremos colocado en dirección norte-sur.

ESTRELLAS NOTABLES

Como ya se ha dicho, todas las estrellas de la constelación son débiles.

Alfa (magnitud 3,8) es una estrella blanca que se halla a unos 100 años luz de nosotros, sin ningún atractivo especial, aparte de ser la más luminosa del grupo.

Tampoco Beta (magnitud 4,4), una estrella amarillenta, a una distancia aproximadamente el doble de Alfa, no presenta ningún motivo de interés. Podemos completar el cuerpo del Lagarto procediendo de norte a sur y siguiendo la línea quebrada que forman, además de Alfa y Beta, las estrellas designadas con los números de Flamsteed 4, 5, 2, 6 y 1.

8 *Lacertae* es una estrella doble formada por un par de estrellas azules de magnitud 5,7 y 6,4, separadas por un ángulo de unos 20''. Su resolución puede conseguirse con un pequeño telescopio.

OBJETOS DEL LAGARTO

El Lagarto está atravesado parcialmente por la Vía Láctea, lo que explica la presencia de dos cúmulos abiertos dignos de mención:



Arriba, detalle del límite entre el Lagarto y el Cisne, una zona muy poblada de estrellas en la que es visible, a la izquierda, el objeto nebular IC 5146, una nebulosa situada en el Cisne.

NGC 7209 y NGC 7243. El primero es un grupo de estrellas de novena magnitud que se extiende unos 20 minutos de arco. El segundo es más luminoso, ya que las 10 estrellas de octava y novena magnitudes hacen de él un objeto perteneciente a la sexta magnitud y, por tanto, al alcance de unos prismáticos corrientes. También las dimensiones aparentes de NGC 7243 equivalen a 20 minutos.

BL LACERTAE

BL *Lacertae* no es una estrella variable, sino una galaxia elíptica (magnitud 13) que se halla a una distancia de aproximadamente 1.000 millones de años luz, y cuya luminosidad varía también en tres magnitudes de modo irregular. Para poder observar su núcleo luminoso se necesita un telescopio de al menos 15 cm de apertura. Es el prototipo de una clase de galaxias de las que todavía no se ha conseguido explicar sus variaciones de luminosidad.

DÓNDE BUSCARLA

EL LAGARTO

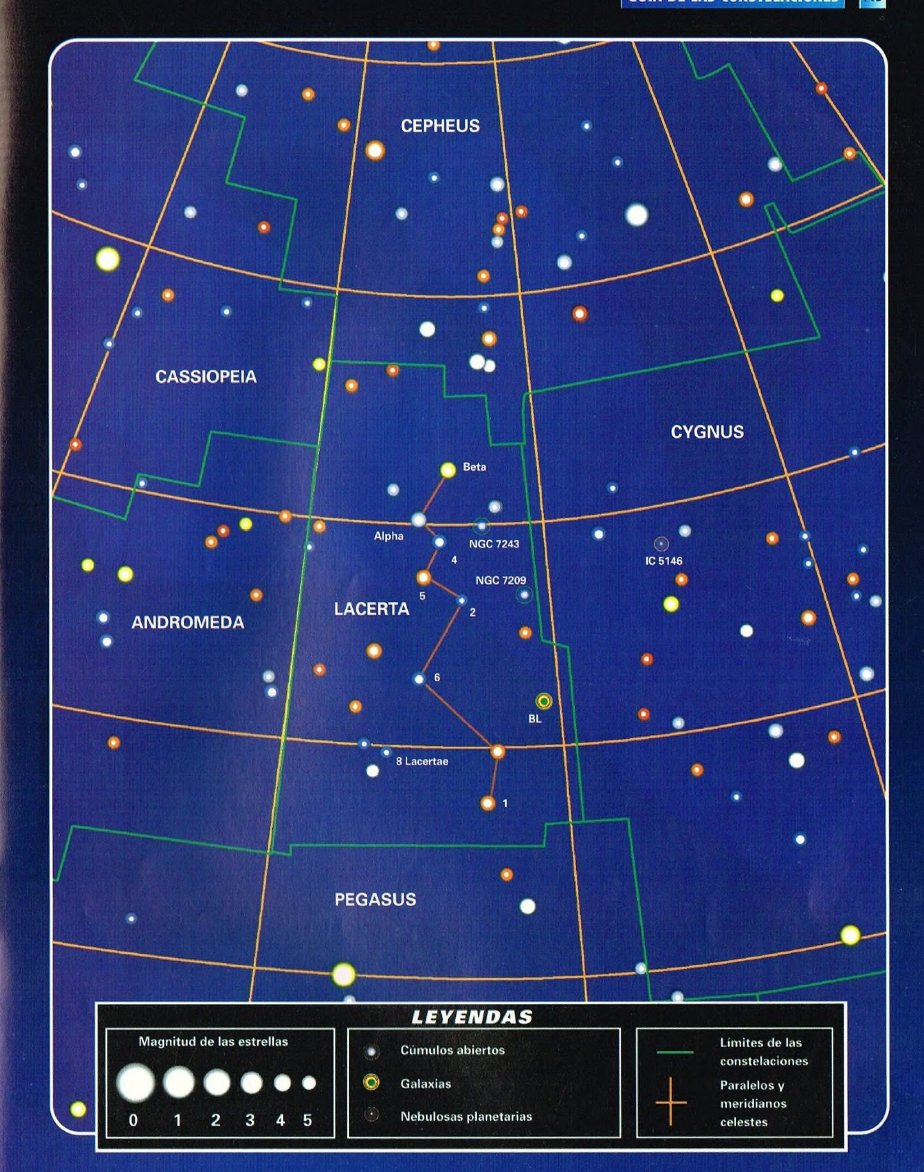
La constelación del Lagarto abarca una región del cielo comprendida entre 35º N y 56º N de declinación, y entre 21 horas 55 minutos y 22 horas 55 minutos de ascensión recta. Es íntegramente visible todo el año desde latitudes situadas más al norte que 55º N y parte del año desde las regiones comprendidas entre 55º N y 34º S. Desde latitudes más al sur de 34º S nunca es enteramente visible. En latitudes como la de España, el Lagarto transita por el cenit a finales de agosto.

LOS MITOS Y LAS ESTRELLAS

EL LAGARTO

Inventada en el siglo XVII, la constelación del Lagarto no se asocia a ninguna leyenda antigua, pero hay que destacar el interés que muchos personajes que vivieron posteriormente a Hevelius dedicaron a esta constelación.

Entre ellos, recordaremos a Augustin Royer, arquitecto del rey de Francia Luis XIV que, en 1697, con el deseo de poner en esta zona del firmamento una constelación que uniera el recuerdo del Rey Sol a la inmutabilidad de la bóveda estrellada, llamó a este grupo estelar Cetro y Mano de la Justicia. Sin embargo, de su idea sólo quedó constancia en los documentos de la época, ya que se aceptó como nombre corriente el de Lagarto. Evidentemente, esta constelación atraía las simpatías de quienes querían recordar a su soberano, puesto que el gran astrónomo alemán Bode inventó, en 1787, un nombre para ella: Gloria de Federico, como homenaje a Federico II de Prusia. Pero la constelación de Bode siguió el mismo destino que la de Royer.


CEPHEUS
CASSIOPEIA
CYGNUS
Beta
Alpha
NGC 7243
4
IC 5146
NGC 7209
5
2
LACERTA
ANDROMEDA
6
BL
8 Lacertae
1
PEGASUS
LEYENDAS
Magnitud de las estrellas
0 1 2 3 4 5
Cúmulos abiertos
Galaxias
Nebulosas planetarias
Límites de las constelaciones
Paralelos y meridianos celestes

MEDIR LA VELOCIDAD DE LA LUZ

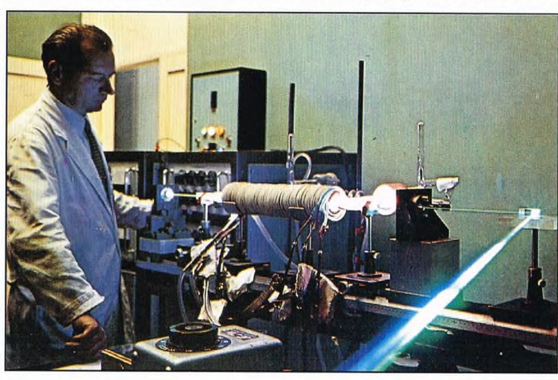
La velocidad de la luz es la máxima velocidad que permiten las leyes de la física. A pesar de ser muy elevada, no es infinita. Para medirla, se han hecho muchísimas tentativas.



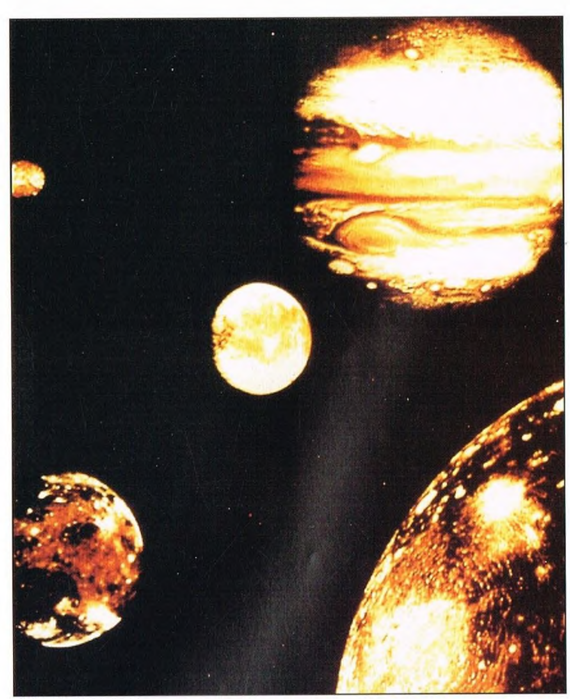
Todo lo que sabemos del universo procede de la radiación electromagnética que emiten los cuerpos celestes y que llega hasta nosotros, hasta la Tierra. La luz forma parte de esta radiación que nuestra vista y los telescopios ópticos consiguen percibir. Hay diversos tipos de ondas electromagnéticas, según el valor de su longitud de onda (la distancia entre una cresta de onda y la inmediatamente siguiente). Los tipos de onda pueden ir desde las ondas de radio, cuya longitud puede ser incluso del orden de kilómetros, hasta los rayos gamma, de longitud de onda pequeñísima, del orden de la milmillonésima de centímetro.

RADIACIONES ELECTROMAGNÉTICAS

La luz está formada por radiación electromagnética de una longitud de onda comprendida entre 0,8 y 0,4 micras (1 micra equivale a 1 milésima de milímetro). Todas las ondas electromagnéticas, y por tanto, también la luz, se propagan a una velocidad que, en el vacío, es de unos 300.000 km/s. En nuestra vida cotidiana no nos damos cuenta de que también la luz tiene una velocidad finita, precisamente porque es muy alta. Pero esto no es así en el caso de las ondas sonoras: sabemos perfectamente que el sonido se propaga hasta nosotros con una cierta velocidad a partir del objeto que lo produce. Pensemos, por ejemplo, en una tormenta y en los truenos y rayos que la acompañan: primero vemos el rayo y luego oímos el trueno. Esto es debido a que el sonido se propaga a una velocidad inferior



Al lado, la luz que se obtiene a la salida de un dispositivo láser (del inglés* Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), dadas sus propiedades especiales, tiene aplicación en campos muy diversos, de la electrónica a la medicina.



A la izquierda, la fotografía representa el planeta Júpiter con sus satélites. Con la medición hecha por Roemer de las discrepancias entre los tiempos de revolución de los satélites de este planeta, se consiguió determinar por primera vez la velocidad de la luz.

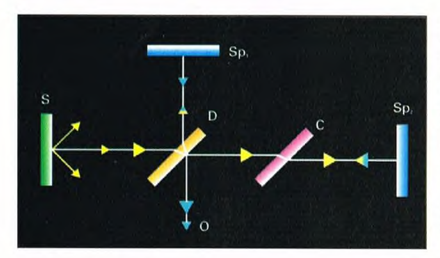
vemos llegar de una estrella en realidad haya partido del astro hace mucho tiempo. La estrella que hoy vemos en el cielo es posible que haya explosionado y que ya no exista, pero nosotros todavía no lo hemos podido advertir. Piénsese, por ejemplo, que la luz de las estrellas más próximas a nosotros, como *Proxima* y Alfa *Centauri*, tarda unos cuatro años en llegarnos, mientras que la de las estrellas que se encuentran en los límites de nuestra Galaxia puede tardar tiempos del orden de los cien mil años. En astronomía se acostumbra a utilizar una unidad especial de medida para las distancias, el año luz, que es el recorrido que puede efectuar la luz en un año; equivale a unos 9,4 billones de kilómetros. La medida de la velocidad de la luz resulta muy difícil, porque es muy elevada respecto a las velocidades que manejamos en nuestra vida cotidiana. Por tanto, no ha de sorprendernos que la primera medición de la velocidad de la luz se efectuara a partir de observaciones de carácter astronómico, en 1675, por el físico danés Olaus Roemer (1644-1710). Éste midió los tiempos de revolución de los satélites de Júpiter en base a su paso por detrás del disco del planeta. Vio que estos tiempos eran diferentes si se medían en dos épocas distintas del año (hizo las mediciones en los meses de agosto y noviembre), es decir, cuando Júpiter y la Tierra se encuentran próximos o alejados entre sí. Roemer

a la de la luz y, por tanto, primero nos llega la señal luminosa (el relámpago) y, al cabo de un cierto tiempo, la sonora (el trueno). El intervalo de tiempo que transcurre entre ambas es más largo cuanto más lejos de nosotros se ha desencadenado el rayo.

A grandes distancias, como las astronómicas, el hecho de que la radiación luminosa viaje a una velocidad determinada, grande pero no infinita, hace que la luz que



La nebulosa del Cangrejo representa lo que queda de una estrella que explosiona como supernova. El hecho de que la luz tenga una velocidad finita hace que nosotros no podamos conocer las condiciones actuales de los cuerpos celestes más lejanos y que sólo podamos observar cómo se presentaban hace mucho tiempo, en una época tanto más remota cuanto más distantes de nosotros se hallen. Si en este momento explosionase una estrella que se encuentra a 100 años luz, sólo nuestros nietos estarían en condiciones de observarla.



Arriba, esquema del interferómetro de Michelson: S, fuente; D, divisor del haz; C, lámina compensadora; Sp_1, primer espejo; Sp_2, segundo espejo; O, observador o detector.

justificó esta discrepancia aduciendo que la luz, cuando la Tierra y Júpiter se alejan uno de otro, debía tardar más tiempo, respecto a la medición anterior, para llegar a la Tierra. De este modo consiguió estimar la velocidad de la luz en 214.300 km/s. En una época algo más reciente, una nueva medición de la velocidad de la luz utilizando el mismo método dio una estimación de 299.840 km/s. Posteriormente, la velocidad de la luz fue medida por el físico francés Fizeau en 1849, que halló 315.300 km/s, esta vez sin recurrir a fenómenos astronómicos, sino basándose en experimentos efectuados en tierra.

EL MÉTODO DEL ESPEJO ROTATORIO

Un modo muy interesante de medir la velocidad de la luz fue el que inventó el físico Foucault. Su método, llamado del espejo rotatorio, permite hacer esta medición incluso en espacios no muy grandes. El aparato utilizado en el experimento, modificado más tarde por el físico Michelson, consiste en una fuente (A) que emite un haz luminoso. Éste pasa a través de una lámina semitransparente (EF) colocada a 45° y una lente (L), e incide sobre un espejo (B) que gira con una velocidad angular ω. El espejo refleja la luz que, por tanto, queda enfocada sobre el espejo cóncavo (C). Desde ahí, la luz vuelve a recorrer, a la inversa, el mismo camino para formar sobre la lámina semitransparente (EF) una imagen reflejada. Esta imagen no coincidirá exactamente con la fuente (A), porque entretanto el espejo (B) ha girado un ángulo α ($\alpha = 2 \times d \times \omega / c$), donde *d* es la distancia entre el espejo rotatorio (B) y el espejo cóncavo (C), mientras que *c* es la velocidad de la luz. Por consiguiente, es posible determinar la velocidad de la luz *c* midiendo, simplemente, en la lámina (EF) la distancia *r'* entre la imagen de la fuente (A) y la imagen reflejada; *r'* viene dada por la siguiente relación:

$r' = (\sqrt{2} \times 4 \times d^2 \times b \times \omega) / c \times (d+a)$

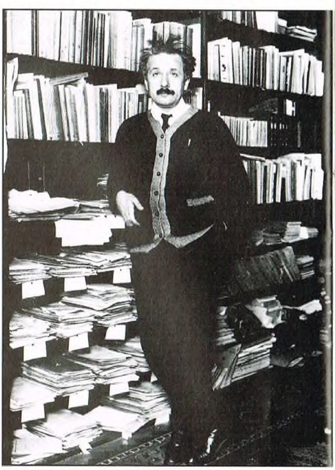
donde *a* es la distancia entre la lente (L) y el espejo rotatorio (B), mientras que *b* es la distancia entre la lente (L) y la fuente (A). La velocidad de la luz *c* viene, pues, dada por la relación:

$c = (\sqrt{2} \times 4 \times d^2 \times b \times \omega) / r' \times (d+a)$.

En esta relación, las cantidades *a, b, d,* ω son todas medibles en el laboratorio y, por tanto, *c* puede determinarse gracias a este sencillo cálculo. Foucault, en 1850, halló para la velocidad de la luz el valor de 298.000 km/s. En 1853, el propio Foucault calculó por primera vez la velocidad de la luz en el agua y consiguió demostrar que es menor que la velocidad en el aire. La relación entre la velocidad de la luz en el vacío *c* y la velocidad de la luz en cualquier otro medio *v* recibe el nombre de índice de refracción del medio (n); n = c/v.

Espejo cóncavo C
A = fuente
EF = lámina semitransparente
B = espejo rotatorio
d = distancia BC
d
E
F
B
Lente L
A

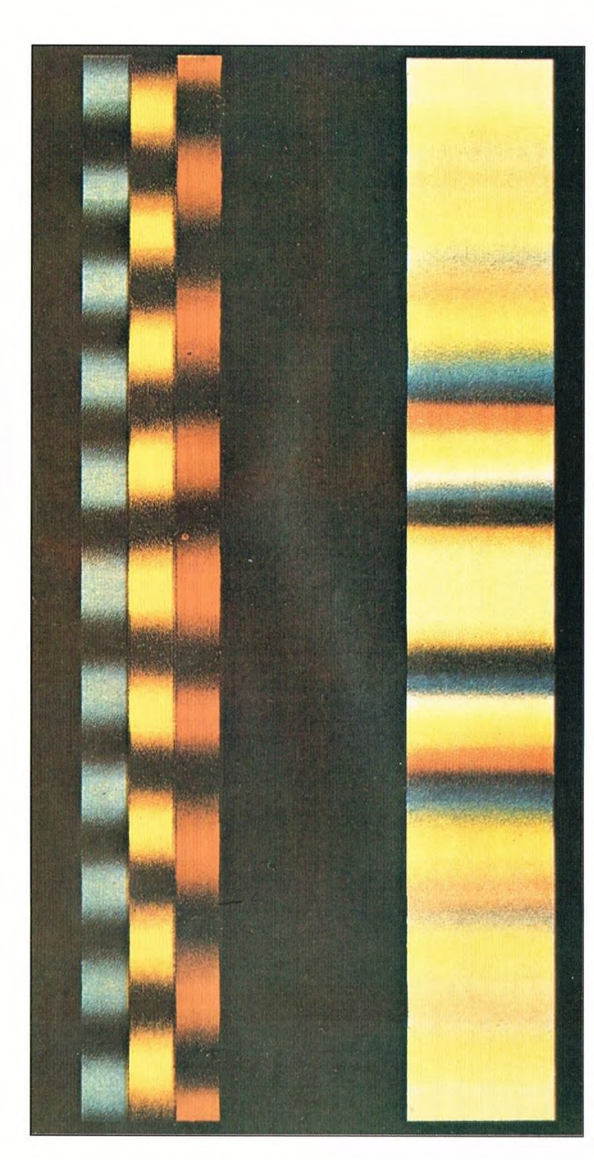
A la izquierda, en la figura, se representa el aparato para medir la velocidad de la luz con el método del espejo rotatorio. Este aparato, inventado por Foucault, fue perfeccionado por Michelson.



Arriba, Albert Einstein (1879-1955) desarrolló la teoría de la relatividad, que asienta una de sus bases en el principio según el cual la velocidad de la luz en el vacío es constante e independiente del estado de movimiento de la fuente.

EL INTERFERÓMETRO DE MICHELSON Y MORLEY

En 1887, los científicos Michelson y Morley, con un célebre experimento interferométrico, llegaron a la conclusión de que en el vacío la luz se propaga siempre con velocidad *c*, independientemente del movimiento de la fuente o del observador. Observaron, en particular, que el movimiento de la Tierra no influye en la velocidad de la luz. La constancia de esta velocidad, que deriva del experimento de Michelson y Morley, fue adoptada por Albert Einstein como una de las leyes fundamentales en las que se basa la teoría de la relatividad que él desarrolló. Además, Einstein demostró que ningún cuerpo ni señal pueden viajar a una velocidad superior a la de la luz. Este hecho pone unos límites muy estrictos a las comunicaciones que pueden establecerse a distancias de un orden similar a las astronómicas. Ya hemos dicho, por ejemplo, que sólo después de transcurridos unos cien mil años desde el momento de su partida podemos recibir una señal electromagnética procedente de una estrella situada en el extremo de nuestra Galaxia. En la práctica, todo esto significa que nunca podrá construirse una astronave



LA ABERRACIÓN DE LA LUZ

Uno de los fenómenos relacionados con la velocidad de la luz y el movimiento del observador respecto a la fuente es la llamada aberración de la luz. Se debe a que el movimiento orbital de la Tierra alrededor del Sol hace que la posición de la estrella sufra un desplazamiento aparente en el transcurso del año. James Bradley descubrió este fenómeno en 1727 observando el desplazamiento súbito de la estrella γ *Draconis* a lo largo del año respecto a las otras estrellas.

que viaje a una velocidad superior a la de la luz. Sin embargo, se puede pensar que existen fenómenos físicos que generan velocidades superiores a *c*. Por ejemplo, cabe imaginar un reflector fijado a tierra que apunte un haz de luz hacia el cielo. Si se hace girar el reflector sobre sí mismo con una velocidad angular ω, existirá siempre una distancia *r* del reflector –medida a lo largo del haz– para la cual la parte final del haz se desplazará en el firmamento con una velocidad $\omega \times r$ superior a la de la luz. Obsérvese que este hecho no atenta contra la teoría de la relatividad porque no existe una conexión causa/efecto entre las sucesivas imágenes que el reflector proyecta en el cielo.

A partir de la época de Roemer y hasta hoy, se han efectuado innumerables mediciones de la velocidad de la luz. En muchos experimentos, esta velocidad se ha determinado utilizando ondas electromagnéticas de longitud de onda diferente de las luminosas, por ejemplo, empleando las microondas. Todas las ondas electromagnéticas se propagan, en realidad, con la misma velocidad *c*. En 1944, Dorsey llevó a cabo un estudio en profundidad de todos los experimentos efectuados hasta entonces y llegó a la conclusión de que solamente cinco mediciones hechas entre 1934 y 1944 podían considerarse dignas de consideración. Estos cinco experimentos daban como velocidad media de la luz el valor c = 299.733 ± 10 km/s. En 1983, con la Conferencia General de Pesos y Medidas, se estableció, por fin, que la velocidad de la luz en el vacío tiene el valor de 299.792,458 kilómetros por segundo.

A la izquierda, figuras de interferencia de los rayos luminosos que se obtienen recurriendo al experimento de Michelson y Morley.

SURVEYOR Y LUNIK

LA RIVALIDAD PARA LLEGAR A LA LUNA

La posibilidad de llevar al hombre a la Luna tenía que pasar por el alunizaje suave de sondas en el satélite natural para verificar la consistencia de su suelo. Esto marcó el inicio de una reñidísima competición tecnológica entre soviéticos y estadounidenses.



Antes de enviar a la Luna una astronave con hombres a bordo, tanto estadounidenses como soviéticos, empeñados en una despiadada rivalidad tecnológica, confiaron la misión a vehículos automatizados capaces de verificar el experimento de un alunizaje.

Existía el gran temor de que nuestro satélite fuese una gruesa capa de polvo en el cual se pudiera hundir todo lo que se apoyara en su superficie. Fue esto lo que dio lugar, por parte estadounidense, al proyecto Surveyor, una serie de sondas que, después de posarse suavemente sobre la Luna, debían fotografiar el espacio inmediato, probar la resistencia al alunizaje y también la solidez de la superficie: efectuar, por tanto, un análisis químico del suelo.

La misión de lanzar el Surveyor se confió al Jet Propulsion Laboratory.

Lo mismo que antes los Ranger, primeras sondas estadounidenses que fotografiaron con cierto detalle la superficie de la Luna, también las sondas Surveyor causaron a sus creadores no pocos problemas, aunque también les aportaron éxitos e interesantes resultados.

PRIMERAS DIFICULTADES

Iniciado en 1960 como proyecto estrictamente científico, las sondas Surveyor todavía estaban muy lejos de la fase de vuelo cuando los planificadores del Apolo, el proyecto que debía llevar al hombre a la Luna, decidieron utilizarlas para conseguir ayuda y más informaciones sobre la superficie lunar. Pero la fecha de lanzamiento del primer Surveyor, prevista para 1963, fue imposible de respetar.

Los costes del proyecto fueron aumentando hasta 10 veces la cifra de 72,5 millones de dólares que se estimó inicialmente.

Dificultades en el vehículo espacial y en el nuevo cohete Centaur obligaron a un aplazamiento tras otro, lo que, finalmente, motivó una investigación por parte del Congreso.

El comité para la ciencia y la astronáutica criticó al JPL, la NASA y la Hughes Aircraft, principal firma constructora, por su «escasa capacidad directiva».

En su impaciencia, los críticos olvidaron tomar plenamente en consideración las dificultades que comportaban las misiones confiadas a la sonda. Incluso los propios funcionarios del JPL admitieron haber infravalorado la empresa. El Surveyor era la máquina espacial más compleja concebida

A la izquierda, la rampa de lanzamiento, en cabo Kennedy, del lanzador Atlas Centaur que puso en órbita la séptima y última sonda Surveyor.



Arriba, representación pictórica de una sonda Surveyor en órbita alrededor de la Luna.

y construida hasta aquel momento. En su estructura triangular de aluminio había que incluir depósitos de combustible, pequeños cohetes de dirección, diversos dispositivos sensores, así como todos los aparatos de guía, de la cual dependía el alunizaje suave: radar, ordenador, piloto automático y cohetes de frenado. Su peso total a la partida era de casi 1.000 kilogramos.

Después de un viaje de 386.000 km, el Surveyor, dirigido desde tierra, debía apuntar su cohete de frenado hacia la Luna con una inclinación muy exacta. A unos 320 km de distancia de la superficie, el radar indicador de altura tenía que entrar en acción y, a menos de 100 km, ordenar el encendido del cohete de frenado. Su chorro reduciría la velocidad de la sonda Surveyor de 9.654 a unos 400 kilómetros por hora.

LA SEGUNDA ETAPA

En este momento, otro radar, igual al que los astronautas deberían utilizar en su descenso a la Luna, lanzaría señales al satélite natural para guiar el Surveyor hacia la superficie. Tres motores cohete más pequeños servían para ejercer un mayor empuje de frenado hasta que el vehículo se encontrara a unos cuatro metros del suelo lunar. Entonces, con los motores apagados, el vehículo planearía sobre la superficie de la Luna. Todo esto debía realizarse teniendo bajo control las operaciones de los soviéticos, cuya finalidad era también enviar sondas automáticas capaces de alunizar suavemente.

Mientras que el Surveyor todavía no había entrado en la fase de experimentación y de puesta en funcionamiento, la Unión Soviética se estaba aproximando a la consecución de sus objetivos.

A pesar de que los cinco primeros intentos soviéticos de alunizaje suave fallaron, el 31 de enero de 1966 uno de sus vehículos espaciales, el Lunik 9, llegó a la superficie de la Luna en condiciones de operatividad.

LAS SONDAS LUNIK

Una vez más, Estados Unidos debía contentarse con el segundo puesto. A juzgar por los informes soviéticos, parecía que el Lunik 9 era muy distinto de los sofisticados Surveyor. En realidad, se trataba de una esfera de dimensiones algo superiores al diámetro de una pelota de baloncesto; pesaba menos de 100 kg y fue lanzada a la superficie lunar inmediatamente antes de que el vehículo espacial al que iba unida se destruyese. En su rebote sobre la Luna, el revestimiento protector del Lunik 9 se separó tal como estaba previsto, permitiendo la salida de una telecámara. La sonda tuvo tiempo de enviar 27 fotografías de rocas y del suelo antes de que sus baterías se agotaran.

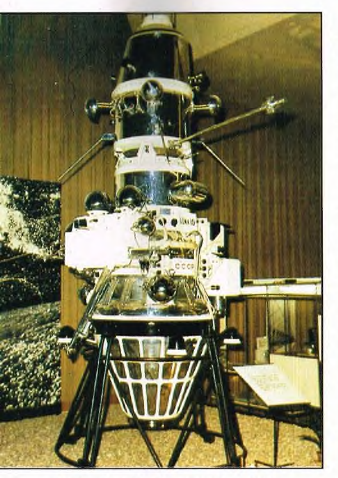
Unos dos meses después, el 2 de abril, el Lunik 10 fue el primer vehículo que orbitó la Luna. Con un peso de 245 kg, llevaba instrumentos para medir eventuales radiaciones y magnetismo, y para determinar la densidad de la corteza lunar. Al parecer, no llevaba aparatos fotográficos a bordo, pero sí una cinta magnética con la grabación de *La internacional*, que fue retransmitida a la Tierra. Un análisis de los datos del Lunik 10 ofreció la primera prueba concreta de que la Luna tenía una corteza bastante parecida

ADIVINA QUÉ HAY AL OTRO LADO DEL CRÁTER

«¡Imprevisto! No lo creerás: adivina qué hay al otro lado del cráter. ¡El viejo Surveyor! Tiene realmente buen aspecto.» De esta manera el comandante de la misión Apolo 12, Pete Conrad, comunicaba a la Tierra su encuentro con el Surveyor 3. En efecto, el LEM del Apolo 12 se había posado a sólo 170 m de aquella sonda. Se quería recoger algunas de las partes, que habían permanecido cerca de tres años expuestas a las radiaciones cósmicas, y evaluar su estado. La nitidez de las huellas dejadas por los «pies» de la sonda, cuando se posó en el suelo dando un par de ínfimos saltos, demostró que durante 31 meses en aquella zona de la Luna no ocurrió absolutamente nada.

DATOS — LAS SONDAS SURVEYOR A LA LUNA

MISIÓN	PARTIDA	LOGROS
Surveyor 1	30-5-1966	Alunizaje suave en el mar de las Tormentas (2,41° S; 43,43° O)
Surveyor 2	2-9-1966	Se precipita sobre la Luna
Surveyor 3	17-4-1967	Alunizaje suave en el mar de las Tormentas (3,33° S; 23,17° O)
Surveyor 4		Pérdida de señales
Surveyor 5	8-9-1967	Alunizaje suave en el mar de la Tranquilidad (23,19° E; 1,52° N) Examen del suelo lunar
Surveyor 6	7-11-1967	Alunizaje suave en *Sinuus medii* (0,25° N; 1,3° O) Examen del suelo lunar
Surveyor 7	7-1-1968	Alunizaje suave en Tycho Brahe (40,9° S; 11,4° O) Examen del suelo lunar



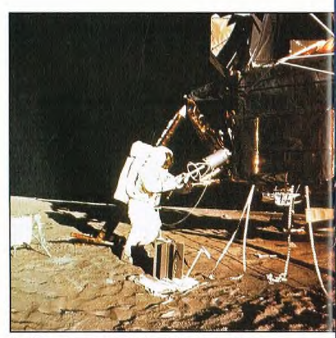
Arriba, el modelo de una sonda soviética Lunik expuesta al público.

a la terrestre. Según los científicos, esto significaba que la Luna, lo mismo que la Tierra, había sido alguna vez materia fundida y que sus rocas, más ligeras, entre ellas el basalto, habían emergido y formado una corteza. Con grandes esperanzas, los funcionarios espaciales estadounidenses se reunieron en cabo Kennedy en mayo de 1966 para el lanzamiento del primer Surveyor.

Los técnicos del JPL se hallaban bajo una gran tensión, ya que presentían que estaba en juego el prestigio de su laboratorio. Por suerte, sus temores demostraron carecer de fundamento. El 2 de junio, después de un vuelo de más de 63 horas, el Surveyor 1 alunizó suavemente en el mar de las Tormentas, cerca del cráter Flamsteed. Su telecámara giratoria entró en acción y transmitió 11.150 fotografías en blanco y negro antes de que cayera la larga noche lunar. Aquellas primeras imágenes permitieron tener la certidumbre de que el suelo lunar era similar a un suelo terrestre no muy duro, cuajado de piedras y terrones. Los geólogos de la NASA observaron también en las fotografías unos bloques de materiales parecidos a mantillo húmedo. La existencia de estos bloques se había supuesto en base al hecho de que las pequeñas partículas tienden a agregarse en condiciones de alto vacío como las que existen en la Luna. Otros científicos afirmaron haber identificado algunas rocas llenas de hoyos que hacían pensar en lava en la cual hubiesen estallado bolas de gas durante el enfriamiento. Cuatro de los seis Surveyor restantes cumplieron también misiones afortunadas y confirmaron de una vez por todas que la Luna era un lugar seguro para el alunizaje.

La sonda Surveyor 2 fue lanzada en septiembre de 1966, cuatro meses después del éxito inicial del proyecto y un mes después de que otro vehículo soviético, el Lunik 11, hubiese entrado en órbita alrededor de la Luna. El Surveyor 2 iba dirigido a la bahía Central *(Sinuus medii)*, pero el fallo de uno de sus cohetes de maniobra hizo que se estrellara contra la superficie lunar. Posteriormente, el 19 de abril de 1967, el Surveyor 3 alunizó suavemente en el mar de las Tormentas e hizo algo más que tomar fotografías: alargó un brazo artificial, plegó los músculos mecánicos y excavó un orificio en la superficie del satélite con una afilada garra metálica. Con movimientos lentos, a veces a impulsos, el brazo mecánico se alargó un metro y medio aproximadamente siguiendo órdenes transmitidas desde la Tierra.

El Surveyor 4 fue un fracaso. Las señales cesaron bruscamente a 11 km de la bahía Central. En cambio, el Surveyor 5 alunizó en el mar de la Tranquilidad el 10 de septiembre y, gracias a un experimento muy complejo, hizo posible la identificación de muchos componentes del suelo lunar. El oxígeno y el silicio eran los elementos que más abundaban en las rocas.



Arriba, un astronauta de la misión Apolo 12 es fotografiado por un compañero mientras efectúa algunos experimentos.

También se pudo concluir que las rocas eran parecidas a los basaltos terrestres. El Surveyor 6 alunizó en la Bahía Central el 9 de noviembre, y el Surveyor 7 fue lanzado a la áspera región de Tycho Brahe, el cráter relativamente joven con radios en su parte meridional. Después del alunizaje, ocurrido el 9 de enero de 1968, la sonda detectó una cantidad inferior de hierro respecto al mar de la Tranquilidad, aunque, en otros aspectos, la Luna parecía ser bastante homogénea.

DATOS — LAS SONDAS LUNIK A LA LUNA

MISIÓN	PARTIDA	LOGROS
Lunik-1	2-1-1959	El 4-1-59 pasa a 6.000 km de la Luna
Lunik-2	12-9-1959	Cae en la Luna en el punto 1° O, 30° N
Lunik-3	4-10-1959	Transmite fotos del lado invisible desde 6.200 km el 10-10-59
Lunik-4	2-4-1963	El 6-4-63 pasa a 8.500 km de la Luna
Lunik-5	9-5-1965	Cae en la Luna en el punto 31° S, 8° O
Lunik-6	8-6-1965	El 11-6-65 pasa a 160.000 km de la Luna
Lunik-7	4-10-1965	Cae en la Luna en el punto 9° N, 40° O
Lunik-8	3-12-1965	Cae en la Luna en el punto 9° N, 63° O
Lunik-9	31-1-1966	Alunizaje suave en el punto 7,1° N; 64,3° O y transmite fotografías
Lunik-10	31-3-1966	El 2-4-66 entra en órbita lunar
Lunik-11	24-8-1966	El 29-8-66 entra en órbita lunar
Lunik-12	22-10-1966	El 25-10-66 entra en órbita lunar
Lunik-13	21-12-1966	Alunizaje suave en el punto 7,1° N; 64,3° O y transmite fotografías
Lunik-14	7-4-1968	El 10-4-68 entra en órbita lunar
Lunik-15	13-7-1969	Se precipita intentando un alunizaje suave
Lunik-16	12-9-1970	Trae a la Tierra una muestra de suelo lunar
Lunik-17	10-11-1970	Lleva a la Luna el vehículo Lunojod de 756 kg
Lunik-18	2-9-1971	Se precipita intentando un alunizaje suave
Lunik-19	28-9-1971	Entra en órbita lunar y transmite fotografías
Lunik-20	14-2-1972	Trae a la Tierra muestras de suelo lunar
Lunik-21	8-1-1973	Lleva a la Luna el Lunojod-2, de 840 kg
Lunik-22	29-5-1974	El 2-6-74 entra en órbita lunar
Lunik-23	28-10-1974	Alunizaje suave, pero falla en la recogida de muestras
Lunik-24	9-8-1976	Trae a la Tierra muestras de suelo lunar



EN EL PRÓXIMO NÚMERO

EL SISTEMA SOLAR

GASPRA E IDA

ESTRELLAS Y GALAXIAS

LA EVOLUCIÓN DE LAS ESTRELLAS DE PEQUEÑA MASA

GUÍA DE LAS CONSTELACIONES

LA LIRA

LA EXPLORACIÓN DEL ESPACIO

PIONEER 10 Y 11

EL USO DEL ESPACIO

EL VERTEDERO ESPACIAL

EL UNIVERSO

ENCICLOPEDIA DE LA ASTRONOMÍA Y EL ESPACIO

23



PLANETA DeAGOSTINI



COMPOSICIÓN DE LA OBRA

Volumen 1	Fascículos 1	al	16
Volumen 2	Fascículos 17	al	32
Volumen 3	Fascículos 33	al	48
Volumen 4	Fascículos 49	al	64
Volumen 5	Fascículos 65	al	80

VENTA EN QUIOSCOS

Pida a su proveedor habitual que le reserve un ejemplar de EL UNIVERSO. Adquiriéndolo todas las semanas en el mismo punto de venta facilitará la distribución y obtendrá un mejor servicio.
Las tapas correspondientes a cada volumen se ponen a la venta con el fascículo que cierra el tomo. Con dicho fascículo se entregan las portadillas correspondientes.

Presidente: José Manuel Lara
Director General: Carlos Fernández
Director Editorial: Virgilio Ortega
Director General de Producción: Félix García
Coordinador General: Carles Dorico

© Editorial Planeta Argentina S.A.I.C.
Av. Independencia, 1668 - Capital Federal
Servicio de atención al cliente: Tel. (01) 482 - 0655 y 482 - 0657
Distribuye: Capital: Huesca-Sanabria,
Baigorri, 103, Capital Federal,
Interior: D.G.P., Alvarado, 2118, Capital Federal

© Editorial Planeta Mexicana, S.A. de C.V.
Av. Insurgentes Sur # 1162 - México D.F.
Servicio de atención al cliente: Tel. 575 13 48

© Editorial Planeta Colombiana, S.A.
Carrera, 68, n.º 25-55 - Santa Fé de Bogotá, D.C.
Servicio de atención al cliente: Tel. 9800 - 15315

© Editorial Planeta Chilena, S.A.I.C.
Olivares, 1229 - Santiago de Chile

ISBN Obra completa (con vídeo): 84-395-4148-1
Obra completa (sin vídeo): 84-395-4138-4
Fascículos (con vídeo): 84-395-4149-X
Fascículos (sin vídeo): 84-395-4139-2
Depósito legal: B-47.097-1997

Impresión: Cayfosa, Santa Perpètua de Mogoda, Barcelona
Impreso en España - Printed in Spain - Mayo 1998

Los editores se reservan el derecho de modificar el precio de venta de los componentes de la colección en el transcurso de la misma, si las circunstancias así lo exigieran.
Los editores garantizan la publicación de todos los fascículos que componen esta obra.

Fotografías: Lee Gibbons: cubierta, 116-117, 116ab., 117ar.; ESA/SPL: 107c.der.; E.T. Archive: 106ar.; Galaxy Picture Library: 101, 104, tercera de cubiertas; IGDA: 107ar.der.; Science Photo Library/Julian Baum: 106-107; Dr. Jeremy Burgess: 103 der.; Range: 111; Hugh Rowland: 110; Spectrum: 110, 111; US Naval Observatory: 112ar.izq.; Bristock-IFA: 114-115; BNSC/ESA: 118ab.; ESA: 118-119, 119ab., 120c.; Tony Stone Picture Library: 120ab.
Dibujos: Robin Carter/WLAA: 104-105, 117ab.; David A. Hardy: 102-103; Hugh Rowland: 105, 106ab., 120; Katz: 108-109; Sandra Russell/Black Hat: 112ar.; Julian Baum: 113; Farroxs: 116ar.; Robin Bottel: 115ab.; Spectrum Picture Library: 114ab.

GASPRA E IDA

Los primeros asteroides fueron descubiertos por Giuseppe Piazzi a principios del siglo XIX. Los detalles de estos pequeños objetos celestes siempre se habían ocultado a los ojos de los observadores, tanto por su tamaño como por su distancia. Pero recientemente, la sonda Galileo ha pasado por las proximidades de dos de ellos.



Antes de la misión de la sonda Galileo, nuestros conocimientos sobre el mundo de los asteroides eran limitados: se sabía que, en general, tienen formas irregulares, ya que su tamaño, relativamente reducido a escala planetaria, les impide asumir el aspecto esférico típico de los planetas y sus satélites mayores. Se han obtenido datos aproximados sobre la forma de estos objetos observando cómo varía en el tiempo su luminosidad, suponiendo que la fracción de luz que es reflejada por la superficie no varía demasiado de punto a punto para un determinado asteroide. También se han formulado hipótesis sobre su composición en base a los datos obtenidos del estudio de los meteoritos caídos sobre la Tierra, partiendo del supuesto de que estos últimos están emparentados con los asteroides. Sin embargo, faltaba una visión que confirmase las hipótesis con imágenes directas. Así, se pensó en aprovechar el viaje de la sonda

En la imagen a toda página, Gaspra tal como aparece en la primera fotografía enviada a la Tierra por la sonda Galileo. Es una fotografía histórica, porque es la primera de un asteroide. En ella se ve una roca de enorme tamaño, de 15 km, cuya superficie recuerda las de la Luna y Mercurio dado que está cubierta de cráteres. Arriba a la derecha, en esta secuencia de imágenes, tomadas desde la sonda Galileo mientras se acercaba a Ida, puede verse la rotación del asteroide.

Arriba, Ida en una fotografía tomada por la sonda Galileo. Al igual que Gaspra, este asteroide tiene una forma irregular, pero llama la atención una diferencia significativa: su superficie muestra muchos más cráteres, señal de que ha permanecido mucho más tiempo expuesto al bombardeo de meteoritos y, por tanto, debe ser más antiguo. También es más grande, porque la longitud de su lado mayor es de 52 kilómetros.

Galileo hacia Júpiter para captar imágenes del cinturón de asteroides que la sonda tenía que atravesar antes de alcanzar el planeta gigante. Estudiando atentamente las órbitas de los asteroides conocidos, y planificando el viaje de la sonda Galileo para llevarla cerca de algunos de estos objetos sin un excesivo consumo de carburante, se logró programar un encuentro con dos asteroides, Gaspra e Ida.

LOS ASTEROIDES DEL CINTURÓN PRINCIPAL

En el sistema solar existe un número elevadísimo de cuerpos rocosos de tamaño menor, es decir, muy inferior al de los planetas. Estos objetos, a diferencia de los planetas mayores, presentan unas órbitas cuyas características varían notablemente de asteroide a asteroide. De hecho, la distancia al Sol de algunos de ellos varía considerablemente, porque sus órbitas son muy elípticas, al contrario de lo que sucede para la mayor parte de las órbitas planetarias, de forma casi circular. En particular, existe una familia de asteroides que toma el nombre de uno de sus componentes, Eros, cuyas órbitas se cortan con la terrestre. Estos asteroides pueden constituir un peligro potencial para nuestro planeta, porque, al atravesar su órbita, podrían ser atrapados por el campo gravitatorio de la Tierra y caer en ella, con efectos no catastróficos para el planeta en sí mismo. Se trata de objetos de dimensiones mínimas en relación a la escala planetaria, pero desastrosos para la vida sobre la Tierra. Sin embargo, la mayor parte de asteroides tienen unas órbitas que discurren por una amplia región comprendida entre las órbitas de Marte y de Júpiter. Las órbitas de estos objetos son casi circulares, por lo que permanecen muy lejos de nosotros. Esta región se llama cinturón principal y es bastante irregular en lo referente a la distribución de los objetos que hay en él. En efecto, existen zonas privilegiadas y otras que están prácticamente

PERSONAJES

GIUSEPPE PIAZZI



1746 - 1826

Fue un gran astrónomo que vivió a caballo entre los siglos XVIII y XIX. A él se debe el descubrimiento de los asteroides cuando, en la noche de fin de año de 1801, descubrió Ceres, uno de los asteroides de mayor tamaño. El padre Giuseppe Piazzi (1746-1826) nació en Valtellina, Italia, se hizo monje en la orden de los teatinos y se licenció en matemáticas y filosofía. Después de haber enseñado matemáticas en Génova y Malta, en 1780 fue llamado a la Academia de Palermo por la familia de los Borbones. En el observatorio local se ocupó de efectuar mediciones de los movimientos de las estrellas, y gracias a estos estudios pudo descubrir los primeros asteroides. Posteriormente dividió su actividad entre Palermo y Nápoles. Gracias a un instrumento de extraordinaria precisión para la época, compiló dos catálogos estelares en los que las posiciones estaban anotadas con un margen de error mínimo respecto a las obras precedentes.



Arriba, el radiotelescopio de Arecibo con el que se realizó la observación de Toutatis. En esta ocasión, el telescopio se utilizó como un radar, enviando impulsos de radio que eran reflejados por el asteroide. Los débiles ecos se analizaron para obtener unas imágenes que permitieron averiguar cuál era la forma del objeto rastreado.

desprovistas de asteroides. Este fenómeno de ausencia de asteroides en ciertas regiones se debe a la influencia gravitatoria de los planetas vecinos, en particular de Júpiter, que, con su gran masa, altera las órbitas de muchos cuerpos celestes. Tanto Gaspra como Ida, los dos cuerpos visitados por la sonda Galileo, forman parte del cinturón principal y, por tanto, orbitan alrededor del Sol a distancias superiores a la de Marte. Sin embargo, su posición en el cinturón principal es diferente: mientras Gaspra está cerca del límite del cinturón más próximo al Sol, Ida está situado aproximadamente en medio. Por esto, su exploración puede proporcionar informaciones útiles sobre la «población» de estas dos zonas, aunque hay que indicar que dos objetos constituyen una muestra poco significativa: es como querer obtener indicaciones sobre la vida de una gran ciudad entrevistando brevemente a dos personas que viven en dos barrios diferentes.

GASPRA

El primero de los asteroides a los que se acercó la sonda Galileo es Gaspra, un «guijarro» irregular de un diámetro máximo de 15 km. Una de las primeras observaciones efectuadas puso de manifiesto los cráteres que hay en su superficie. Evaluando la densidad de cráteres en la superficie de un cuerpo es posible deducir estimaciones sobre la edad del objeto que se estudia, a menos que existan factores que alteren la superficie examinada, como una atmósfera u otros mecanismos, por ejemplo, vulcanismo o movimientos tectónicos. Cuanto mayor es la densidad de cráteres, mayor es la edad del objeto que se observa. Para Gaspra, se ha calculado una edad del orden de 500 millones de años, es decir, del orden de la décima parte de la edad del sistema solar. Por tanto, Gaspra es un objeto relativamente joven. De esto ha surgido la idea de que su origen debería buscarse en la destrucción de un cuerpo de mayor tamaño, del que este asteroide podría ser un fragmento.

LA COMPOSICIÓN DE GASPRA

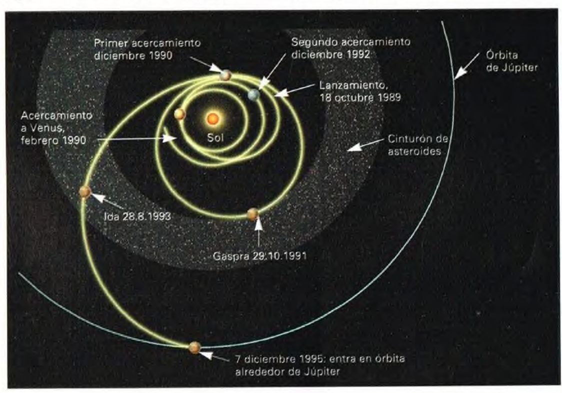
Naturalmente, también se trató de determinar cuáles son los constituyentes principales de Gaspra. El mejor medio para descubrir los materiales de que está compuesto un objeto es proceder al análisis químico de una muestra. Sin embargo, para los objetos celestes, excepto la Luna y los meteoritos, esto no es posible, porque no se pueden tomar fragmentos para analizar. Estudiando el espectro de las radiaciones visible e infrarroja procedente del cuerpo, como la luz reflejada o la radiación térmica, es posible hacerse una idea de los principales componentes existentes. Con este método se descubrió que Gaspra está formado por rocas ricas en hierro y otros metales, y la presencia de hierro ha sido confirmada por la existencia de un débil campo magnético que altera el comportamiento del viento solar, es decir, del incesante flujo de partículas emitidas por el Sol. Esta composición podría explicarse con facilidad con la hipótesis postulada sobre el origen traumático del asteroide. Se puede pensar en un planeta de varios centenares de kilómetros de diámetro que, después de uno o más choques violentísimos, habría sido destruido, por lo que habría enviado fragmentos en varias direcciones. El núcleo metálico habría sido el origen de diferentes asteroides, entre ellos Gaspra.



Arriba, imágenes procesadas del asteroide Toutatis obtenidas con el radiotelescopio de Arecibo. Este asteroide pasó cerca de la Tierra a una distancia suficientemente pequeña para poder efectuar una serie de observaciones radar. En estas imágenes puede verse que Toutatis está constituido por dos grandes bloques casi en contacto. También Gaspra e Ida podrían estar formados por varias partes rodeadas de una gruesa capa de polvo.

IDA

Ida es el segundo asteroide visitado por la sonda Galileo. Es un objeto mayor que Gaspra y de una forma mucho más alargada.



A la derecha, el viaje de la sonda Galileo y sus encuentros con Gaspra e Ida. La órbita de la sonda se estudió para ahorrar carburante aprovechando el impulso producido por sus acercamientos a la Tierra y a Venus. En el esquema también pueden verse las posiciones de los dos asteroides con que se encontró la sonda en el interior del cinturón principal de asteroides.



Arriba, fotografía de Gaspra obtenida por la sonda Galileo el 29 de octubre de 1991.

Su lado mayor mide unos 52 km. Al contrario de Gaspra, Ida presenta una superficie con gran cantidad de cráteres, lo que significa que su origen debe ser anterior. Además, muestra cráteres de grandes dimensiones en su superficie, en mayor proporción que Gaspra. Ida, al igual que Gaspra, presenta diferencias de coloración de su superficie, probablemente debidas en ambos casos a la diversidad de la composición mineralógica de su superficie. Sin embargo, mientras que en el caso de Gaspra es difícil decir si la superficie está recubierta de una capa de polvo producido por los impactos que han creado los cráteres después de su formación, para Ida es casi cierta la presencia de regolitos, porque en algunas de sus fotografías se puede distinguir la presencia de masas del tamaño de algunas decenas de metros. Con toda probabilidad, su origen se debe a los impactos con otros asteroides. Estas masas fueron lanzadas al espacio con velocidades inferiores a la de escape, por lo que, después de haber estado orbitando alrededor del cuerpo progenitor, acabaron por caer en su superficie. Además, Ida presenta trazas de surcos debidos a la caída de material poco ligado en ocasión de algunos de los encuentros que ha sufrido en el curso de su existencia.

EL ORIGEN DE IDA

Seguramente, Ida nació de la escisión de un cuerpo de mayor tamaño. Forma parte de un grupo de asteroides que tienen una órbita bastante similar, lo que podría explicarse suponiendo que tienen un origen común: en la fragmentación de un planeta los pedazos mantienen órbitas similares a la de su progenitor. El grupo de asteroides del que forma parte Ida se llama la familia de Koronis. Probablemente, el cuerpo que dio origen a este grupo de asteroides era un objeto de un centenar de kilómetros de diámetro que se fragmentó debido

Detalle de la superficie de Ida que muestra una gran depresión, probablemente producida por una fuerte colisión con otro cuerpo. Según algunos científicos, estas depresiones podrían ser la prueba de que Ida está formado por varios bloques que se mantienen unidos por la débil fuerza de la gravedad.



ESPECTACULARES COLISIONES

Los asteroides, estas grandes masas que orbitan por el interior del llamado cinturón de asteroides, son protagonistas de acontecimientos dramáticos y espectaculares al mismo tiempo que hacen venir a la mente los efectos especiales de las grandes películas de aventuras espaciales; las colisiones a las que están sometidos desarrollan unas excepcionales fuerzas de choque.

DATOS

GASPRA
dimensiones: 15 x 10 x 9 km
edad estimada: $0,5 \times 10^9$ años

IDA
dimensiones: 52 x 23 x 20 km
edad estimada: 2×10^9 años

Arriba, el cinturón de asteroides está poblado de numerosos objetos cuyas órbitas pueden cruzarse con efectos dramáticos: el impacto entre dos asteroides puede destruir los dos cuerpos, y producir gran cantidad de fragmentos de menor tamaño.

a un violentísimo choque con otro cuerpo de tamaño comparable.

EL SATÉLITE DE IDA

La verdadera sorpresa de Ida consistió en la presencia de un satélite. Observando con atención las imágenes obtenidas por la sonda Galileo, los científicos se dieron cuenta de que en algunas de ellas se podía distinguir un pequeño punto luminoso junto al asteroide. Sucesivas ampliaciones revelaron la verdadera naturaleza del punto: un pequeño cuerpo de 1,5 km de diámetro que orbita a una distancia de unos 90 km alrededor de Ida. La pequeña luna de Ida suscita más de una pregunta sobre su origen: ¿es un fragmento del asteroide alrededor del cual gira, producido por un choque, o se trata de un cuerpo capturado durante el paso por sus cercanías? Si la primera de las dos hipótesis fuera la correcta, los dos cuerpos tendrían la misma composición química. Sin embargo, análisis efectuados con un fotómetro espectral mostraron diferencias en la composición de los dos objetos, lo que hace problemático pensar en un origen común. En consecuencia, la segunda explicación sería más plausible, aunque es casi imposible que se haya producido una captura por parte de Ida, porque es un cuerpo de tamaño modesto y tiene un campo gravitatorio demasiado débil para capturar un objeto de paso y colocarlo en órbita a su alrededor. La única explicación aceptable parece ser la de que Ida y su luna sean fragmentos procedentes del mismo cuerpo, pero de estratos diferentes, para justificar su diferente composición. Estos fragmentos podrían haber sido arrancados por la colisión que llevó a la destrucción del planeta de origen y lanzados en la misma dirección, quedando ligados por la fuerza de la gravedad.



¿FRAGMENTOS SIMPLES O AGLOMERADOS?

Observaciones efectuadas con radar sobre asteroides que han pasado cerca de la Tierra han demostrado que algunos de ellos no eran bloques de roca enteros, sino que estaban constituidos por dos o más fragmentos muy juntos. En base a estas observaciones se ha planteado el problema de si los dos asteroides observados por la sonda Galileo estaban constituidos por dos o más pedazos de roca. Los dos objetos tienen una forma muy asimétrica, que podría ser compatible con una estructura formada por varias masas en contacto. En tal caso, los intersticios entre los diversos bloques estarían rellenados con fragmentos pequeños y polvo similar al regolito lunar. Sin embargo, en la actualidad no existen métodos que permitan dilucidar si esta hipótesis es válida partiendo solamente de los datos recogidos por la sonda Galileo.

A la izquierda, la pequeña luna de Ida. Este pequeño objeto, de un diámetro aproximado de 1,5 km, tiene una forma menos irregular que su compañero mayor. Probablemente, se trata de un fragmento arrancado de Ida después de un choque o de un pedazo del cuerpo cuya fragmentación dio origen a Ida y que quedó junto a este último. También es posible que este pequeño satélite del asteroide se haya formado por la condensación de un anillo de polvo que pudiera haber rodeado a Ida.

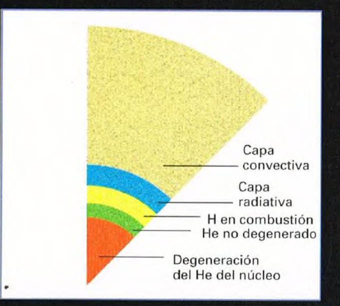
EVOLUCIÓN DE LAS ESTRELLAS DE MASA PEQUEÑA

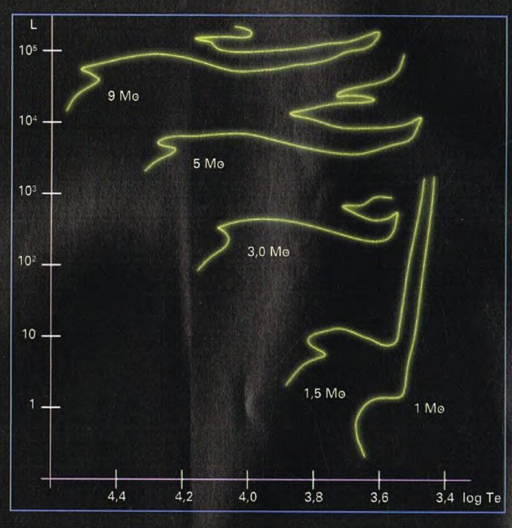
Las estrellas como el Sol tienen un destino común: transformarse en gigantes rojas y luego, después de haber expulsado su envoltura exterior de gases, en enanas blancas.



La vida de una estrella transcurre por entero bajo el influjo de dos fuerzas: la de la gravedad, que tiende a contraerla haciéndola colapsar por efecto de su propio peso, y la creada por las reacciones nucleares que se producen en su interior, que tienden a expandir la estrella hacia el exterior. En la fase de formación prevalece la fuerza de la gravedad y la estrella, cada vez más densa y compacta, se calienta hasta alcanzar una temperatura de 10 a 20 millones de grados, suficiente para iniciar las reacciones nucleares de transformación del hidrógeno en helio. En este estado, y durante un largo período de tiempo, las dos fuerzas se equilibran y la estrella permanece estable. Finalmente, cuando el combustible nuclear del núcleo empieza a escasear, el astro se hace inestable y atraviesa por unas fases complejas de su evolución, predominando ora la gravedad, ora la expansión.

Lo que sucede en este punto depende de diversos factores característicos de la estrella: temperatura, densidad y composición química. Pero el factor determinante es la masa y ésta es la que, de manera preponderante, determina si la estrella explosionará como supernova o se convertirá en una enana blanca, una estrella de neutrones o un agujero negro.

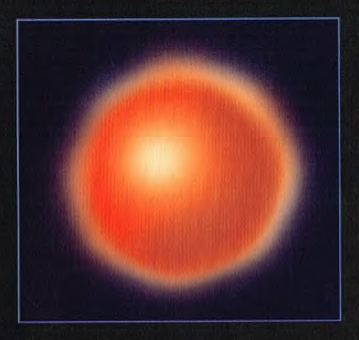




El gráfico muestra la evolución de estrellas con masa entre 1 y 9 masas solares, en un diagrama H-R. En el eje vertical están las luminosidades en unidades solares y, en el horizontal, las temperaturas en escala logarítmica (así, 4 es 10^4). M⊙ = masa solar Log Te = logaritmo de la temperatura L = luminosidad A la izquierda, interior de una estrella de pequeña masa cuando empieza a salir de la secuencia principal. En el centro hay un núcleo de helio degenerado, mientras que el hidrógeno continúa quemando a su alrededor.

¿ESTRELLA O PLANETA?

Antes que nada, hay que tener en cuenta que sólo los objetos suficientemente masivos pueden convertirse en estrellas. Los estudios teóricos muestran que sólo los objetos que tienen una masa superior a 80 veces la de Júpiter se convierten en estrellas propiamente dichas. Los de pequeña masa (hasta 17 veces la masa de Júpiter) están destinados a mantenerse como planetas, mientras que los de masa intermedia entre estos dos valores son objetos extraños, demasiado grandes para ser considerados planetas, pero demasiado pequeños, y por tanto demasiado fríos, para que en su interior puedan desencadenarse las reacciones nucleares características de las estrellas. Se trata de las fantasmagóricas enanas morenas, objetos oscuros, poco luminosos y muy difíciles de observar, que a veces se confunden con planetas muy masivos. Sólo en tiempos muy recientes, gracias al telescopio espacial Hubble, se ha obtenido la prueba visible de la existencia de estos objetos.





A la izquierda, dos dibujos del estado de una estrella de pequeña masa durante su evolución. En el primero, la estrella se expande y enfría hasta convertirse en gigante roja, saliendo de la secuencia principal del diagrama H-R. El exterior de la estrella aparece más rojo y mucho más luminoso porque ha aumentado de manera desmesurada su superficie radiante. En el segundo dibujo se ve el núcleo de la estrella, en el centro, que ha colapsado y se ha calentado, preparándose para convertirse en enana blanca. A su alrededor, todo el material perdido por las capas más externas de la estrella formará una nebulosa planetaria.

LA FORMACIÓN

Como es sabido, las estrellas se forman a partir de nubes de gas interestelar situadas por doquier en el disco de la Galaxia, aunque los detalles de este proceso de formación todavía no están suficientemente explicados. En particular, no está claro qué fenómenos pueden iniciar la compresión del gas de la nube para que se inicie la formación de una nueva estrella. Una de las hipótesis más interesantes formuladas por los astrónomos para responder a esta cuestión es que la compresión deriva de la explosión de una supernova en las proximidades de la nube. Estas explosiones generan unas ondas de choque que comprimirían el gas e iniciarían su compresión en las zonas de mayor densidad.

Al proseguir la contracción, la temperatura central aumenta y la protoestrella se convierte en una fuente de energía infrarroja. Cuando la temperatura se hace suficientemente elevada, el hidrógeno empieza a quemarse, la contracción cesa y la estrella se sitúa en la secuencia principal del diagrama de Hertzsprung-Russell.

CUANDO SE AGOTA EL HIDRÓGENO

En este punto, la estrella atraviesa un larguísimo período de tranquilidad, que representa cerca del 90% de su vida, y cuya duración depende de su masa. Nuestro Sol, por ejemplo, es actualmente una estrella de la secuencia principal: se calcula que nació hace unos 4.500 millones de años y que permanecerá estable durante un tiempo parecido.

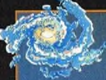
Después, la estrella se hace inestable y el destino que le espera puede seguir caminos diferentes.

Supongamos que se trata de una estrella de pequeño tamaño, cuya masa está comprendida entre 0,1 y 4 masas solares. Una característica de las estrellas de masa pequeña es que en sus capas más internas no se produce convección: el material que las compone no se vuelve a mezclar, como sucede por ejemplo en una olla de agua puesta a hervir al fuego o en las estrellas de gran masa. Esto significa que, cuando el hidrógeno del núcleo empieza a agotarse, no es reemplazado por el hidrógeno que hay en las capas más externas. Sin embargo, este último continúa quemándose en una capa que envuelve el núcleo y que, poco a poco, también va transformándose en helio.

Mientras el núcleo de helio se contrae y se calienta, las capas externas también reajustan y readaptan su propia estructura. En el diagrama H-R, la estrella abandona lentamente la secuencia principal. La densidad de la materia en el centro de la estrella va aumentando y el material del núcleo se vuelve degenerado, es decir, adquiere una consistencia particular, diferente de la que tiene la materia normal.

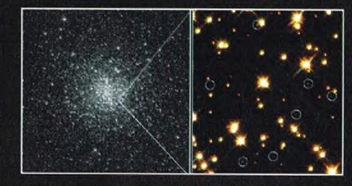
LA MATERIA DEGENERADA

Los átomos quedan «empaquetados» tan estrechamente que los electrones no pueden moverse con libertad por el material del núcleo estelar. La consecuencia más importante en esta situación de materia degenerada es que la presión sólo depende de la densidad del gas y no de su temperatura, como sucede normalmente. En el diagrama de Hertzsprung-Russell, la estrella se va desplazando hacia la derecha y luego hacia arriba, acercándose a la región de las gigantes rojas. Su tamaño aumenta enormemente y la temperatura



MATERIA DESAPARECIDA EN LAS REACCIONES NUCLEARES

La energía que se genera en las reacciones nucleares del centro de una estrella deriva sobre todo de la fusión de los cuatro protones que forman el núcleo del helio. Sin embargo, en esta transformación desaparece masa. Por ejemplo, un protón tiene una masa de 1,008125 uma (unidad de masa atómica); por tanto, 4 protones tienen una masa de 1,008125 x 4 = 4,0325 uma. Si se pesa un núcleo de helio, se comprobará que sólo pesa 4,0039 uma, es decir, menos de lo que pesan los 4 protones que lo forman. Esto significa que en la transformación ha desaparecido una masa igual a 4,0325-4,0039 = 0,0286 uma. Esta masa se ha transformado en energía de acuerdo con la famosa relación de Einstein $E = mc^2$ (donde c es la velocidad de la luz) y ésta es la fuente de energía que permite a las estrellas brillar durante miles de millones de años. Por cada núcleo de helio que se forma se libera una energía de 26,7 millones de electronvoltios. De esta manera, en el Sol se destruyen 4,5 millones de t de materia cada segundo.



Dos imágenes del cúmulo globular M4, en Escorpión. A la izquierda se ve el cúmulo en su conjunto, a unos 7.000 años luz de distancia; es uno de los más cercanos a la Tierra. A la derecha, detalle de una pequeña región del cúmulo que muestra algunas enanas blancas, señaladas con circulitos.

de las capas más exteriores disminuye por efecto de esta expansión, porque la misma cantidad de energía se distribuye por una superficie mucho mayor.

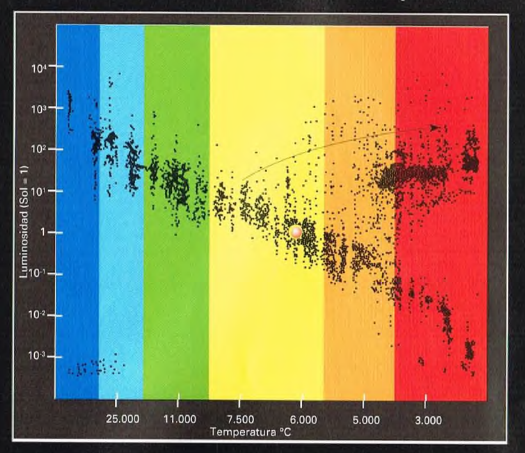
Una gigante roja es una estrella que puede tener un diámetro del orden de centenares de millones de kilómetros. Cuando nuestro Sol pase por esta fase, probablemente absorberá a Mercurio y Venus y, si no llega a englobar también a la Tierra, la calentará tanto que hará imposible la existencia de vida en ella. ¡Por suerte, disponemos de un tiempo bastante largo para pensar en la manera de solucionar este problema!

En cambio, la temperatura del núcleo de la estrella en evolución aumenta. En efecto, el núcleo, al no estar ya sostenido por las reacciones nucleares, se contrae hasta que su temperatura es lo suficiente elevada para iniciar la fusión del helio. Cuando sucede esto, el rápido aumento de la temperatura del material degenerado del núcleo produce una variación explosiva de la región central y la estrella se desplaza rápidamente hacia la izquierda del diagrama H-R. Se trata del llamado flash del helio. Entonces, la estrella se encuentra en una situación en la que el núcleo de helio arde junto con el hidrógeno que está confinado en una capa que rodea al propio núcleo. En el diagrama H-R, la estrella evoluciona de nuevo horizontalmente hacia la derecha, definiendo el característico brazo horizontal del diagrama de los cúmulos globulares.

EL DIAGRAMA H-R Y LAS ÚLTIMAS FASES DE LA EVOLUCIÓN ESTELAR

Una vez más, el diagrama H-R se revela como un instrumento de investigación muy útil, que en este caso nos permite estudiar la evolución de las estrellas. Si pudiésemos seguir el recorrido que una estrella efectúa por él durante toda su existencia, la veríamos desplazarse como se ha descrito anteriormente. Por supuesto, esta observación es imposible en la práctica, porque requeriría miles de millones de años. Sin embargo, el gran número de estrellas que hay en el universo nos permite reconstruir las diversas fases de la evolución estelar observando diferentes estrellas, cada una en un momento particular de su vida.

Cuando todo el helio del núcleo se ha transformado en carbono, se forma un núcleo degenerado cuya temperatura todavía aumenta hasta que, si la estrella es suficientemente masiva, el carbono empieza a quemarse. Tanto si esto sucede como si no, estas últimas etapas van acompañadas de una sustancial pérdida de masa de la superficie de la estrella. Esta pérdida de masa puede producirse en varias etapas o en un acontecimiento único, en el que las capas exteriores de la estrella son proyectadas hacia el exterior como una gran burbuja. En este último caso se forma una nebulosa planetaria, es



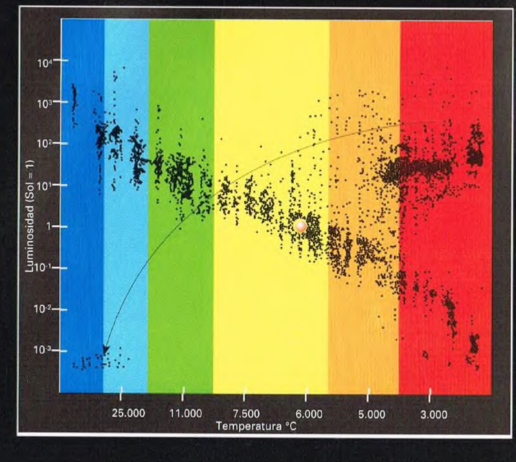
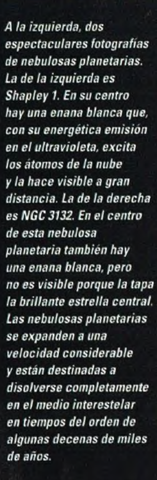


Diagrama H-R de una muestra de estrellas cercanas al sistema solar. Si pudiésemos observar la posición que ocupa una estrella como el Sol en este diagrama, nos daríamos cuenta de que ésta cambia con el tiempo. En el primer gráfico se ve una estrella que, desde la secuencia principal, se desplaza hacia la zona de las gigantes rojas. En el segundo, una vez la estrella ha superado la fase de gigante, emigra hacia la región de las enanas blancas.







A la izquierda, dos espectaculares fotografías de nebulosas planetarias. La de la izquierda es Shapley 1. En su centro hay una enana blanca que, con su energética emisión en el ultravioleta, excita los átomos de la nube y la hace visible a gran distancia. La de la derecha es NGC 3132. En el centro de esta nebulosa planetaria también hay una enana blanca, pero no es visible porque la tapa la brillante estrella central. Las nebulosas planetarias se expanden a una velocidad considerable y están destinadas a disolverse completamente en el medio interestelar en tiempos del orden de algunas decenas de miles de años.

decir, una envoltura esférica de materia expulsada que se propaga por el espacio a gran velocidad, a decenas e incluso a centenares de kilómetros por segundo.

LAS NEBULOSAS PLANETARIAS

En nuestro cielo pueden verse varios ejemplos de nebulosas planetarias, algunas de las cuales incluso están al alcance de un telescopio de aficionado. Probablemente, la más famosa es M57, en la constelación de la Lira. Aparece como un pequeño disco débilmente luminoso, en cuyo centro se ve la estrella que la ha generado. Luego está la nebulosa Helix (NGC 7293), una de las mayores y cercanas nebulosas planetarias, de magnitud 6,5, en la constelación de Acuario. Más débiles son M76 en Perseo y M97 en la Osa Mayor.

Estas nebulosas deben el nombre a su aspecto circular, que en tiempos pasados hizo creer a los primeros observadores que se trataba de planetas. A pesar de que sólo están compuestas de un gas tenue, son visibles a distancias considerables porque están iluminadas por la luz muy energética de las estrellas que las han emitido.

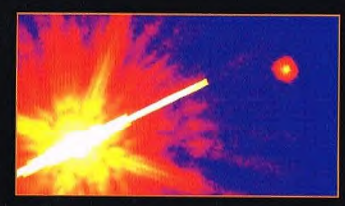


A la izquierda, una imagen detallada del Sol tomada con rayos X. En la superficie de nuestra estrella puede verse (a la izquierda) una notable protuberancia que se eleva decenas de miles de kilómetros por encima de la fotosfera. Nuestro Sol es una típica estrella de tamaño medio-pequeño, por lo que es posible prever su futuro con cierta seguridad. Dentro de unos 4.000 a 5.000 millones de años se expanderá hasta convertirse en una gigante roja que envolverá los planetas interiores del sistema solar y convertirá la Tierra en un planeta árido y quemado. Luego terminará su vida como enana blanca, enfriándose lentamente a lo largo de varios miles de millones de años.

COMO EL ARGUMENTO DE UNA PELÍCULA

En el cielo tenemos las pruebas observacionales de las teorías de la evolución estelar. Naturalmente, no podemos seguir toda la vida de una determinada estrella porque se necesitaría demasiado tiempo. Sin embargo, tenemos la posibilidad de observar millones de estrellas, cada una de las cuales representa alguna fase de la evolución de un cierto tipo de estrellas. Es como tener muchos fotogramas de una película y tratar de reconstruir su argumento.

Fotografía de gran campo de la nebulosa Laguna en la constelación de Sagitario. Contiene un cúmulo de estrellas jóvenes y varios glóbulos oscuros que, sometidos a la gravedad producida por su propio peso, se contraerán hasta convertirse en protoestrellas.



Se calcula que sólo en nuestra Galaxia, la Vía Láctea, hay entre 10.000 y 100.000 nebulosas planetarias: actualmente se han observado y catalogado más de 1.500. Las nebulosas planetarias, además de ser muy espectaculares para la observación, son importantes porque tienen influencia en la composición del medio interestelar. La materia de la que están compuestas, sintetizada en el centro de las estrellas generatrices, se dispersa de forma lenta por el espacio (se calcula que transcurren cerca de 30.000 años para que una nebulosa planetaria se disuelva por completo hasta hacerse inobservable). De esta manera, su materia queda disponible para formar nuevas estrellas y sistemas planetarios.

LA ÚLTIMA FASE: LAS ENANAS BLANCAS

El destino final de la estrella depende una vez más de la masa residual que tiene el astro al final de todas las peripecias evolutivas antes descritas. Si en las sucesivas expansiones y contracciones ha expulsado bastante materia para quedar por debajo del límite de 1,4 masas solares, se convierte en una enana blanca. Este límite, llamado límite de Chandrasekhar en honor del astrofísico paquistaní del mismo nombre, es la masa máxima que permite la teoría para que la estrella detenga su colapso, sostenida por la presión ejercida por los electrones del núcleo muy compactados los unos contra los otros.

El núcleo estelar que queda después de la expulsión de las capas más exteriores tiene una temperatura superficial muy alta (del orden de 100.000 K). En esta última fase de su vida, la estrella se mueve hacia el extremo izquierdo del diagrama H-R y desciende hacia abajo, es decir, su luminosidad disminuye. Esta disminución se debe al tamaño de la estrella que, al reducirse, dispone de una superficie radiante muy pequeña.

La estrella entra poco a poco en la región de las enanas blancas, que tienen un tamaño muy pequeño (del orden de un planeta como la Tierra), pero de una densidad muy elevada, un millón y medio de veces más densa que el agua. Se piensa que un centímetro cúbico de la materia de la que está compuesta una estrella de este tipo situado en la Tierra, ¡pesaría cerca de 1,5 toneladas!

Una enana blanca está destinada a terminar su existencia sin acontecimientos explosivos, simplemente apagándose lentamente. En realidad, se piensa que este enfriamiento es tan lento que desde el principio de la historia del universo ninguna enana blanca ha llegado todavía a la muerte térmica.



A la izquierda, una imagen tomada por el telescopio espacial Hubble que muestra la estrella Gliese 105A. Se trata de una estrella cercana que tiene una compañera. El Hubble logró fotografiarla; probablemente se trata de una enana morena. Arriba, dos imágenes de la estrella Gliese 229B. También en este caso, la estrella tiene una compañera muy débil de pequeña masa y los cálculos parecen demostrar que se trata de una enana morena. En las dos imágenes se ve, a la izquierda, una toma hecha con un gran telescopio en la Tierra y, a la derecha, la misma imagen tal como se ve con el telescopio espacial.
Arriba a la derecha, fotografía de un detalle de la nebulosa planetaria Helix (NGC 7293) en la constelación de Acuario. En la imagen se ven algunos grumos producidos por la interacción entre el gas de la nebulosa y una región en que el medio interestelar es muy denso.

Abajo, fotografía del cúmulo abierto M7 en la constelación de Escorpión, situado a unos 800 años luz del sistema solar. Las estrellas del cúmulo (de magnitudes comprendidas entre 7 y 11) todavía están rodeadas de una evidente nebulosidad, signo de su temprana edad. Las estimaciones teóricas dan para éstas una edad del orden de 70 millones de años, realmente pocos para las estrellas.



PÉRDIDA DE MASA

La pérdida de masa durante la evolución es fundamental para una estrella. Si pierde la suficiente para descender por debajo del límite de 1,4 masas solares, podrá terminar su vida como enana blanca. Además del fenómeno de las nebulosas planetarias, existen otros mecanismos eficientes de pérdida de masa, uno de los cuales es característico de los sistemas dobles. Muchas estrellas tienen compañeras con las que orbitan alrededor de un centro de masas común. Si una de las dos componentes evoluciona hacia la etapa de gigante roja, la presencia de la cercana compañera le impedirá expandirse libremente y la atracción gravitatoria de esta última prevalecerá, arrancando literalmente una parte del material de la estrella en expansión. Estos procesos conducen a la pérdida de una fracción considerable de la masa de las estrellas y a ellos van asociados interesantes fenómenos, en particular el de las novas.

LA LIRA

Pequeña pero antigua constelación del hemisferio septentrional, la Lira está dominada por Vega, uno de los vértices del Triángulo Estival.



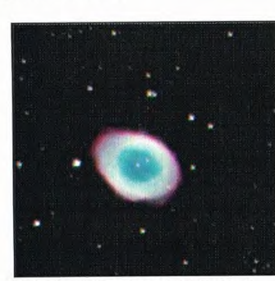
La constelación de la Lira representa la pequeña arpa muy empleada en la Antigüedad. Su estrella principal es Vega, una de las más brillantes del cielo. Recientes mediciones han establecido que el ápex solar, el punto de la bóveda celeste hacia el cual se mueve el Sol, seguido de la Tierra y de los demás planetas del sistema solar, está situado en esta constelación.

CÓMO LOCALIZAR LA CONSTELACIÓN

Vega está aproximadamente a 20° en dirección suroeste de Deneb, la cola de la vecina constelación del Cisne. El resto de la constelación está reunido alrededor del astro más brillante.

ESTRELLAS NOTABLES

Alfa, la ya citada Vega (magnitud 0), es una brillante estrella blancoazulada. Por su luminosidad aparente viene después de Arturo, con la que rivaliza en el cielo. El satélite IRAS, que ha efectuado observaciones en el infrarrojo, ha revelado la presencia de un anillo de polvo alrededor de esta estrella, indicio de una posible presencia de planetas. Vega también es importante porque, debido a la precesión de los equinoccios, dentro de 12.000 años será la estrella Polar. Beta o Sheliak (magnitud 3,5) es una estrella doble con componentes de colores diferentes. Para separar las dos estrellas, que tienen magnitudes de 3,5 y 8,6, basta un pequeño telescopio. Pero la componente principal también es una variable que oscila regularmente entre las magnitudes 3,3 y 4,3. El motivo de la variabilidad de esta estrella es la presencia de una compañera, tan cercana, que no puede separarse ni con los telescopios más potentes, pero cuya presencia se deduce por sus recíprocos eclipses con la estrella principal. En realidad, estas dos estrellas, que en el telescopio aparecen como un astro único, están tan próximas que se intercambian continuamente la materia que las forma: se trata de un sistema de estrellas de contacto, que proyectan al espacio grandes cantidades de gas. A pesar de las peculiaridades de Alfa y Beta, la estrella que llama más la atención es Épsilon, de quinta magnitud. Con una visión muy buena se puede apreciar a simple vista que está formada por dos astros muy próximos, aunque esta visión es más fácil con unos prismáticos. Un telescopio de 10 cm de apertura y de gran aumento muestra que las dos estrellas que componen el sistema Épsilon están a su vez formadas por un par de pequeñas estrellas, con un total de cuatro. Estas estrellas están ligadas por la recíproca atracción gravitatoria. RR es el prototipo de una clase de estrellas variables y regulares que se caracterizan por períodos del orden de un día terrestre. Esta estrella varía entre las magnitudes 7,1 y 8.



Arriba, la nebulosa planetaria M57 es la más famosa del cielo y puede observarse fácilmente con telescopios pequeños.



La lira es el instrumento musical con que Orfeo acompañaba su canto, que maravillaba a quienes lo escuchaban.

OTROS OBJETOS DE LA LIRA

M57 es una célebre nebulosa planetaria situada a mitad de camino entre las estrellas Beta y Gamma, cuya forma ha merecido el nombre de nebulosa Anular. Aparece como un débil disco luminoso. M56 es un cúmulo globular de octava magnitud situado a 50.000 años luz de nosotros.



LOS MITOS Y LAS ESTRELLAS

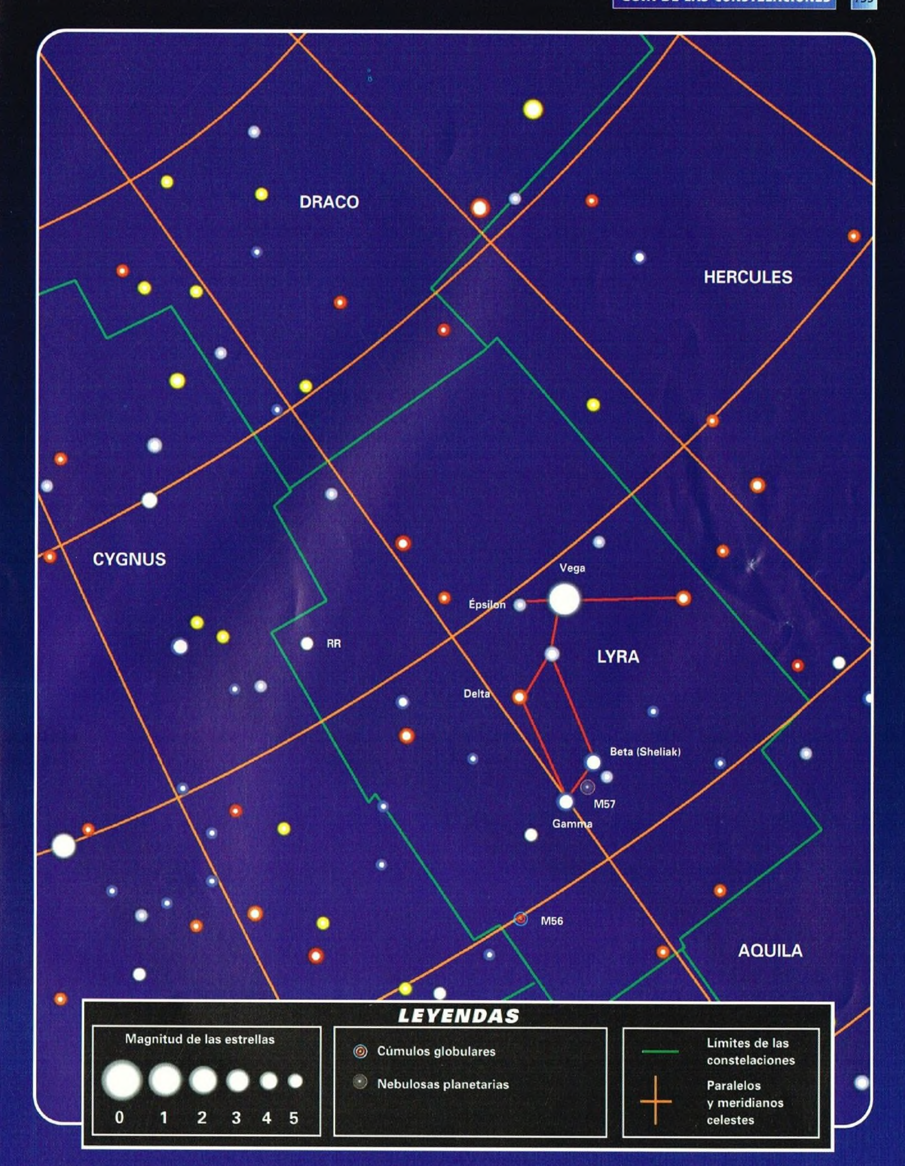
LA LIRA

La Lira representa el instrumento musical con el que Orfeo, el hombre del canto melodioso, que incluso podía conmover las piedras, acompañaba sus canciones. La leyenda quiere que esta pequeña arpa fuera la primera que se construyó y que la había hecho Mercurio. Evidentemente, el sonido de esta lira debía de ser muy dulce, porque Mercurio logró apaciguar a Apolo, a quien había robado ganado, proponiéndole a cambio el instrumento como resarcimiento del robo. Después, Apolo regaló la pequeña arpa a Orfeo. Entre otras cosas, este último se sirvió de ella para convencer a Plutón, rey del reino de los muertos, de que le devolviera a su esposa, Eurídice. Sin embargo, la historia no tuvo un final feliz, porque Orfeo no pudo resistir la tentación de mirar a su amada antes de volver a la superficie, contraviniendo así el pacto estipulado con Plutón y perdiendo a su mujer para siempre.

DÓNDE BUSCARLA

LA LIRA

La constelación de la Lira abarca una región del cielo comprendida entre 25° N y 47° N de declinación, y entre 18 horas 10 minutos y 19 horas 30 minutos de ascensión recta. Es íntegramente visible todo el año desde latitudes situadas más al norte que 65° N y parte del año desde las regiones comprendidas entre 65° N y 43° S. Desde latitudes más al sur que 43° S nunca es enteramente visible.


DRACO
HERCULES
CYGNUS
Vega
Épsilon
RR
LYRA
Delta
Beta (Sheliak)
M57
Gamma
M56
AQUILA
LEYENDAS
Magnitud de las estrellas
0 1 2 3 4 5
Cúmulos globulares
Nebulosas planetarias
Límites de las constelaciones
Paralelos y meridianos celestes

PIONEER 10 Y 11:

DOS SONDAS GEMELAS HACIA LOS GRANDES PLANETAS

Incluso antes de conquistar la Luna, los estadounidenses ya pensaban en la exploración de los planetas más lejanos del sistema solar. Con esta intención nacieron las dos sondas Pioneer 10 y 11, a las que se confió la misión de explorar de cerca Júpiter y Saturno.



Todavía faltaba un año para la conquista de la Luna cuando el nivel tecnológico alcanzado por la Space Science Board de la Academia Nacional de Ciencias de EEUU permitió a este país afirmar que era capaz de construir una sonda que podía superar Marte y el tenue cinturón de asteroides para alcanzar los planetas más lejanos del sistema solar.

El mismo organismo indicaba a Júpiter como el posible objetivo de la misión que debía proyectarse. Poco menos de un año después, en febrero de 1969, la NASA iniciaba el proyecto para la construcción no de una, sino de dos sondas que pudiesen alcanzar al gigante de los planetas. Además, una de las dos cápsulas espaciales se dirigiría hacia Saturno.

UN RETO TECNOLÓGICO

Pioneer 10 y 11, los nombres dados a las dos sondas interplanetarias, se construirían con características similares, pero se lanzarían con trayectorias diferentes. La realización del proyecto constituía una verdadera revolución en el campo tecnológico, porque las sondas debían superar dificultades ambientales nunca encontradas hasta entonces por ningún objeto lanzado al espacio por el hombre.

En efecto, para un viaje tan largo, era necesario prever un sistema de alimentación de energía que no dependiese del Sol, porque una vez cerca de Júpiter, la cantidad de energía que llega de nuestra estrella es unas 27 veces menor que la que puede captarse cerca de la Tierra y ningún panel solar podría generar la suficiente energía para hacer funcionar las sondas interplanetarias.

Pioneer 11, que debería llegar a las proximidades de Saturno, tendría que haber funcionado con una energía 90 veces menor que la energía existente cerca de nuestro planeta.

Pero esto no era todo. Las sondas debían resistir, en la plenitud de su actividad, los intensos campos magnéticos que hay cerca de Júpiter, que someterían la instrumentación científica a una dura prueba.

Estos problemas fueron asumidos por los científicos estadounidenses como parte de un verdadero reto que debían vencer.

Como responsable del proyecto fue designado el Ames Research Center de Moffet Field, California, que a su vez eligió a TRW System Group de Redondo Beach como la empresa a la que confiar la construcción de las sondas y el Jet Propulsion Laboratory para seguir paso a paso el largo viaje a través del espacio. Esto se haría a través de la antena de 64 m de diámetro de Goldstone, California.

Una vez definido todo esto, se pusieron a punto los detalles científicos del proyecto. Pioneer 10 y 11 deberían estudiar Júpiter y su entorno, el cinturón de asteroides, las características del espacio interplanetario hasta la órbita de Saturno y, finalmente, abandonar el sistema solar y continuar enviando informaciones a la Tierra mientras dispusieran de suficiente energía.



A la derecha, la sonda Pioneer 10 sometida a controles técnicos en el laboratorio de cabo Kennedy antes de su lanzamiento en 1972, que la llevó hasta el cinturón de asteroides.

Generador termoeléctrico de radioisótopos
Sensor de impactos con micrometeoritos
Anillo de separación
Antena de baja ganancia
Rejilla de control térmico
Fotómetro de ultravioletas
Chorros de rotación y contrarrotación
Telescopio Geiger
Antena parabólica de alta ganancia
Cable conductor de energía eléctrica
Sensor solar
Chorro de control de corrección
Antena de media ganancia
Instrumentación para partículas cargadas
Radiómetro de infrarrojos
Telescopio para rayos cósmicos
Analizador de plasma interestelar
Paneles sensores de impactos con micrometeoritos
Magnetómetro

Arriba, gráfico de la complicada estructura de la sonda Pioneer 10.



A la izquierda, un técnico de la NASA revisa los sistemas de vigilancia de la sonda Pioneer, en el marco del proyecto Pioneer-Venus, que se inició en 1978.

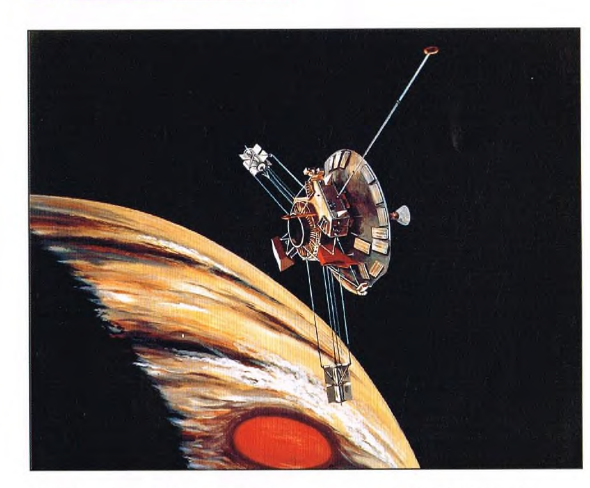
LA MISIÓN EN MARCHA

El 2 de marzo de 1972, la sonda Pioneer 10 partió con un cohete Atlas-Centaur/TE364-4. Por primera vez se había utilizado un cohete Atlas-Centaur de tres etapas. La tercera etapa tenía la misión de impulsar la sonda Pioneer 10 a una velocidad de 51.810 km/h, velocidad necesaria para llegar a Júpiter. Esto hizo de Pioneer 10 el objeto más rápido construido por el hombre lanzado desde la Tierra, tan veloz, que superó la órbita de la Luna después de apenas 11 horas y atravesó la de Marte, a una distancia de 80 millones de km, después de 12 semanas. Transcurridos cuatro meses de la partida, el 5 de julio de 1972, y por primera vez en la historia de la investigación espacial, una sonda entró en el cinturón de asteroides, de 280 millones de km de anchura y unos 80 km de espesor. Esta zona del espacio era particularmente temida por los técnicos de la NASA, pues pensaban que la sonda podía quedar irremediablemente comprometida por el encuentro con pequeños fragmentos de asteroides, que viajan a una velocidad media de unos 20 kilómetros por segundo.

A pesar de los temores, la sonda Pioneer 10 salió de aquella trampa espacial sin ningún problema.

La sonda Pioneer 11 fue lanzada de cabo Cañaveral el 5 de abril de 1973 y también atravesó indemne el cinturón de asteroides, evaluando de una vez por todas el riesgo real de aquella zona del espacio interplanetario.

La sonda Pioneer 10 llegó a Júpiter el 3 de diciembre de 1973 y, después de haber fotografiado su superficie desde una distancia de 130.000 km de altura, continuó su viaje estudiando las partículas cargadas procedentes de nuestro Sol, el llamado viento solar, y los rayos cósmicos procedentes de la Vía Láctea.



Arriba, la sonda Pioneer 11 en órbita alrededor de Júpiter (reconocible por la Gran Mancha Roja) en una representación pictórica.

A principios de 1997, la sonda, que estaba a unos 10.000 millones de km de la Tierra, continuaba enviando informaciones sobre el espacio interestelar. A esta distancia, las señales de radio procedentes de la sonda, que viajan a la velocidad de la luz, tardan más de ocho horas en llegar a nuestro planeta. En cambio, la sonda Pioneer 11 fue colocada en una órbita que la llevó a pasar a sólo 43.000 km de altura sobre la superficie de Júpiter el 2 de diciembre de 1974.

Durante su mayor aproximación a Júpiter, la sonda Pioneer 11 obtuvo espectaculares imágenes de la Gran Mancha Roja. Además, por primera vez, observó las regiones polares del planeta y determinó la masa de su satélite Calisto. Acelerada por la masa de Júpiter, se colocó en una trayectoria que, a la velocidad de 173.000 km/h, la llevó hasta Saturno el 1 de septiembre de 1979. Además de un estudio cercano del planeta de los anillos, Pioneer 11 descubrió dos nuevas lunas que orbitan alrededor de Saturno, determinó las características del campo magnético del planeta y descubrió que el satélite Titán, que por ciertas características podría parecerse a la Tierra en su estado primordial, es demasiado frío para poder albergar formas de vida.

Al continuar su viaje más allá de Saturno, la sonda ha recogido el mismo tipo de informaciones del espacio interplanetario que su gemela Pioneer 10, las cuales han permitido efectuar importantes comparaciones y comprobaciones.

LOS INSTRUMENTOS DE A BORDO

Once instrumentos científicos y un sistema radiotransmisor son los «huéspedes» de las sondas.

Los instrumentos tenían la finalidad de detectar las características químicas de los micrometeoritos e investigar las características del plasma, las partículas cargadas. Durante su vuelo hacia Júpiter se midió la cantidad que hay en el espacio de hidrógeno, helio, litio, berilio, boro, carbono, nitrógeno y oxígeno, diferenciando los elementos procedentes del Sol de los que entran al sistema solar desde la Vía Láctea. Además, las sondas efectuaron mediciones del campo magnético que hay alrededor de los grandes planetas mediante un telescopio Geiger y estudiaron los rayos cósmicos con otro telescopio adecuado.

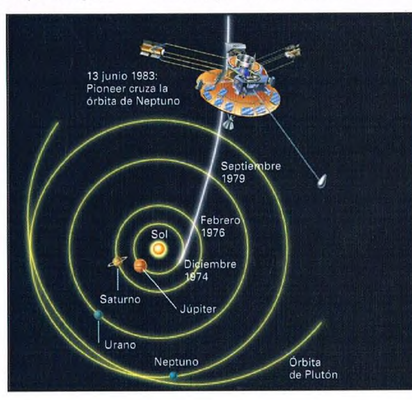
Además, a bordo también había un fotómetro de ultravioletas y un radiómetro de infrarrojos, que tenían la finalidad de determinar la estructura térmica y la composición química de cada planeta, así como la temperatura de su entorno y de los anillos de Saturno. También había un fotopolarímetro para tomar, con un detalle nunca obtenido hasta ahora, imágenes en colores de las nubes que cubren Júpiter y Saturno y determinados detalles de los anillos de este último.

Otro instrumento, llamado Experimento de mecánica celeste, permitía determinar la velocidad de las sondas con sólo un error de 1 mm/s. Esta información se enviaba a la Tierra una vez por minuto.

Las más pequeñas variaciones de velocidad han permitido a los científicos determinar las masas de los cuerpos celestes a los que se acercaron las sondas.

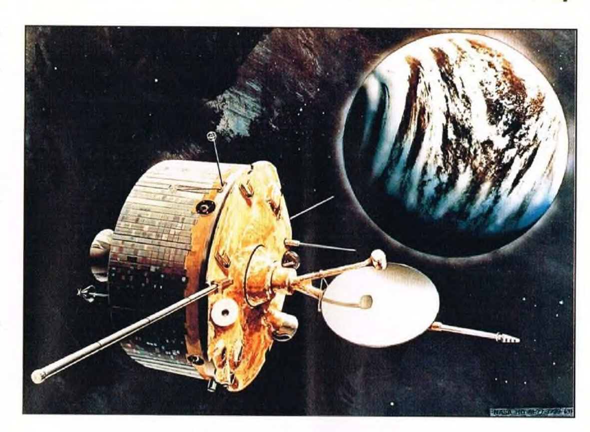
Así, por ejemplo, se pudo determinar con precisión la masa de Júpiter y, con un 1% de error, las de sus satélites mayores. Algunos de estos instrumentos iban encerrados en el interior de un contenedor, mientras que otros iban montados en la parte exterior de la gran antena parabólica de 2,74 m de diámetro.

Del cuerpo central sobresalían tres brazos dispuestos a 120° entre sí. Dos de ellos tenían en su extremo dos generadores de radioisótopos SNAP-19. Mediante la desintegración del plutonio 238 contenido en su interior, en el momento de su lanzamiento generaban una potencia de 155 W, que descendió a 140 W en el



A la derecha, en el gráfico se ilustra el viaje de la sonda Pioneer 11 a través del sistema solar. El 13 de junio de 1983 superó la órbita de Neptuno.

A la derecha, un dibujo que representa la misión Pioneer hacia Venus en 1978, en el que se han representado el orbitador y, a la derecha, Venus.



momento en que las sondas llegaron a Júpiter, pero que les permitió una autonomía energética durante todo el tiempo de funcionamiento.

El tercer brazo llevaba en su extremo un magnetómetro. Para mantener estables las sondas se les había impartido una rotación de 4,8 vueltas por minuto alrededor de su eje principal, mientras que las pequeñas correcciones de trayectoria podían efectuarse con tres pares de cohetes de hidracina que se habían montado en el disco de la antena principal.

Por obvios motivos de seguridad, algunos de los principales sistemas de a bordo estaban duplicados; por ejemplo, el transmisor de a bordo, cuya potencia era del orden de 8 W. Los datos se enviaban a la Tierra en forma digital a 2.048 bits/s durante el viaje de la Tierra a Júpiter y a 1.024 bits/s cuando las sondas estaban cerca de Júpiter y Saturno.

LAS SONDAS PIONEER 10 Y 11 HAN TERMINADO SU TRABAJO

Después de 22 años viajando por el sistema solar, la misión Pioneer 11, una de las exploraciones espaciales de mayor duración y más fructífera de la historia de la conquista espacial en cuanto a resultados, fue declarada como finalizada por la NASA.

La sonda está más allá de la órbita de Plutón, a una distancia de cerca de 8.000 millones de km de la Tierra, y al principio de su viaje por el espacio interestelar.

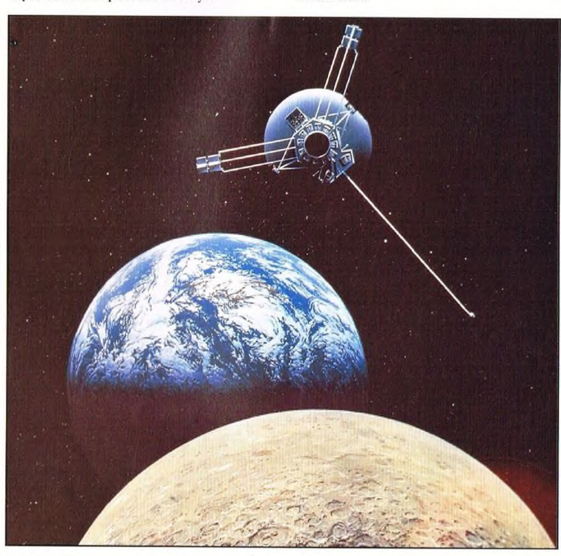
El 30 de septiembre de 1995 se comprobó que la sonda disponía de una potencia eléctrica demasiado baja para permitir que los instrumentos funcionasen y enviasen sus datos a la Tierra, por lo que la NASA decidió cortar las comunicaciones diarias que mantenía con la sonda.

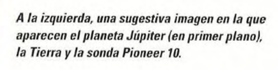
A aquella distancia, las débiles señales procedente de la sonda Pioneer 11 empleaban casi 6 horas en llegar a la Tierra. La sonda continuará su viaje hacia el centro de la Vía Láctea, llevando consigo una placa de oro en la que hay grabado un mensaje que indica de dónde partió y cómo son los habitantes del planeta Tierra.

Pioneer 11 pasará cerca de la estrella Lambda *Aquila* dentro de unos cuatro millones de años.

En cambio, la sonda Pioneer 10, que viaja a la fantástica velocidad de 12,5 km/s, continuó recogiendo informaciones sobre el espacio interplanetario, aunque debido a su baja potencia eléctrica, seis de sus once instrumentos de a bordo se desactivaron; entre ellos, el telescopio para rayos cósmicos.

La sonda superó la órbita de Neptuno el 13 de junio de 1983, convirtiéndose en el primer objeto construido por el hombre en salir de la órbita de los planetas exteriores del sistema solar. En aquel momento, Plutón se encontraba en el interior de la órbita de Neptuno. Actualmente, la sonda Pioneer 10 está en una trayectoria que la llevará a las proximidades de la estrella *Proxima Centauri*. Se desactivó en marzo de 1997.

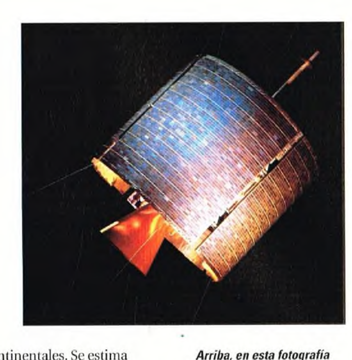




A la izquierda, una sugestiva imagen en la que aparecen el planeta Júpiter (en primer plano), la Tierra y la sonda Pioneer 10.

EL VERTEDERO ESPACIAL

Increíble, pero cierto: nuestro planeta está rodeado de miles de desechos espaciales. Se trata de los satélites científicos, de telecomunicaciones, militares, meteorológicos, etc., que hoy ya están fuera de servicio y que constituyen un peligroso y voluminoso lastre.



Arriba, en esta fotografía de la NASA se muestra el INTELSAT-1, habitualmente llamado Early Bird por los operadores.



Entre los planetas de nuestro sistema solar, Saturno sobresale por la presencia de los anillos de materia que lo rodean. Si observásemos la Tierra desde el espacio, podríamos ver, con un poco de atención, que nuestro planeta también tiene anillos. Pero a diferencia de los de Saturno, se trata de anillos artificiales constituidos por miles de satélites colocados alrededor de la Tierra en los últimos 30 años. Aunque en la mayoría de los casos se trata de objetos de pequeño tamaño, su efecto sobre el entorno espacial no es, ni mucho menos, despreciable.

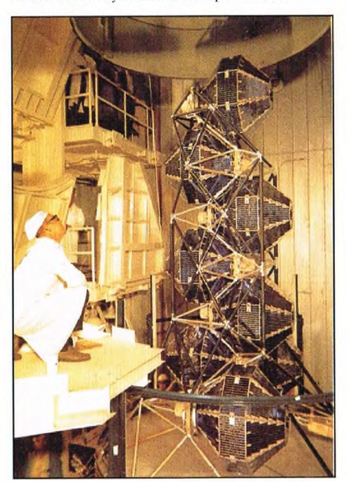
MUCHOS SATÉLITES, PERO POCOS FUNCIONANDO

El inicio de la era espacial, a principios de los años sesenta, ha permitido al hombre ampliar sus propios límites y utilizar, tanto para finalidades pacíficas como militares, el espacio que rodea nuestro planeta. En el primer caso basta pensar en el número siempre creciente de satélites que se utilizan en el campo comercial, por ejemplo, para permitir las telecomunicaciones entre un extremo y otro del planeta. En el campo científico, los satélites encuentran numerosas aplicaciones en el campo de la meteorología y en los estudios geológicos.

Los satélites dotados de instrumentos de referencia para los GPS (Global Positioning System) tienen, además, un papel determinante en el control de la navegación. En el campo militar, los satélites se emplean preferentemente en funciones de espionaje y para dirigir la trayectoria de los misiles balísticos intercontinentales. Según el proyecto de defensa estratégica SDI, más conocido como Escudo Estelar, imaginado a mitad de los años ochenta por el entonces presidente Reagan, el espacio que rodea la Tierra debería estar cubierto por una densa red de satélites para la defensa del territorio de Estados Unidos contra los misiles soviéticos. La posición de estos satélites es conocida con extrema precisión y son mantenidos bajo control por los radares de los sistemas de defensa estadounidenses del NORAD (y del análogo ruso) que barren constantemente el cielo para prevenir un posible ataque nuclear mediante misiles balísticos intercontinentales. Se estima que sólo el 5% de estos satélites todavía funcionan, mientras que los demás deben estar totalmente desactivados, tanto por causas naturales ligadas al envejecimiento de los instrumentos de a bordo, como por causas accidentales o simplemente porque han terminado su vida operativa.

LA ACTIVIDAD DEL NORAD

El NORAD, iniciales de North American Air Defence Command, es el centro de control de la aeronáutica estadounidense que se ocupa de la defensa aérea de Estados Unidos. Controla una densa red de radares que barren el cielo para identificar eventuales misiles balísticos intercontinentales. Por este motivo, una de sus misiones es catalogar objetos volantes no identificados y controlar el desplazamiento



A la izquierda, una rampa de ocho satélites estadounidenses IDC SS destinados a uso militar. Satélites de este tipo se utilizaron para transmitir informaciones durante la guerra del Vietnam.



de cualquier objeto conocido que sobrevuele la superficie de nuestro planeta, incluidos los satélites en órbita.

LOS ASTRÓNOMOS Y EL ESPACIO

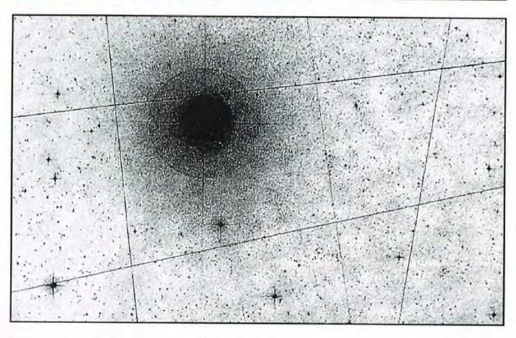
Respecto al uso pacífico del espacio, las observaciones efectuadas por satélites orbitantes son esenciales para algunos sectores de la investigación astronómica.

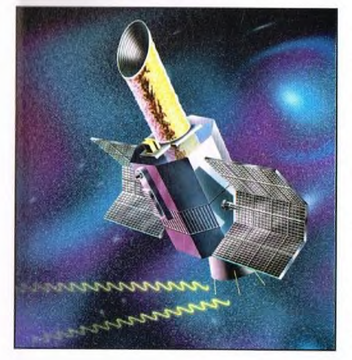
La atmósfera terrestre no se comporta de la misma manera frente a los diversos tipos de radiación electromagnética procedente del espacio. La atmósfera es transparente a las mayores longitudes de onda, o sea, menos energéticas, como las radioondas o la luz visible, mientras que es opaca a las radiaciones más energéticas como los rayos ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma. Por tanto, para efectuar investigaciones en estas bandas de energía, es indispensable utilizar detectores situados en órbita por satélites.

Desde principios de los años sesenta son numerosos los satélites dedicados a finalidades astronómicas. Entre los más famosos, recordemos el satélite Einstein de la NASA para rayos X, el satélite IUE de la ESA para el ultravioleta, actualmente el satélite más longevo con sus 15 años de actividad, y el telescopio espacial Hubble. Naturalmente, los satélites astronómicos representan tan sólo una mínima parte de los miles de satélites que hay en órbita alrededor de la Tierra.

LOS PROBLEMAS PARA LA ASTRONOMÍA

La proliferación de esta densa red de satélites en órbita alrededor de nuestro planeta produce consecuencias negativas para la investigación astronómica. De un simple cálculo basado en el número de satélites y en sus órbitas, se deduce que cada hora pasa un satélite por la vertical local. Con frecuencia puede verse un trazo luminoso que surca el cielo nocturno que puede atribuirse al paso de un satélite. Este fenómeno se debe a que, para evitar un excesivo calentamiento por la acción del Sol, los satélites artificiales están construidos con materiales metálicos de alto poder reflector y, por tanto, son objetos de un brillo bastante grande. Este fenómeno aparentemente inocuo es perjudicial para las observaciones astronómicas de un cierto nivel, dado que se hacen utilizando detectores especiales acoplados al telescopio para registrar la luz captada de una fuente celeste durante el tiempo de exposición. Si durante este tiempo la zona de cielo observada por el telescopio es atravesada por un satélite, la imagen resultante quedará contaminada por la presencia de una fina traza luminosa debida a la luz reflejada por el satélite a lo largo de su trayectoria. En particular, se calcula que cerca del 30% de las imágenes astronómicas registradas en las placas fotográficas están contaminadas por señales espúreas debidas a las trazas de los satélites. Por fortuna, este problema resulta menos grave cuando las observaciones se realizan con los modernos detectores de estado sólido, porque las imágenes obtenidas están en formato digital y los ordenadores pueden procesarlas para eliminar los eventuales defectos. Naturalmente, los efectos producidos por el paso de un satélite no sólo alteran las imágenes desde el punto de vista estético, sino que también producen una notable interferencia cuando





Los satélites artificiales pueden producir daños importantes en las observaciones astronómicas. Por ejemplo, a menudo estropean las placas utilizadas por los observatorios astronómicos. En la fotografía superior se muestra una placa malograda del observatorio de Siding Spring, Australia. Arriba, la traza que un satélite ha dejado en una placa fotográfica.

A la izquierda, una imagen del satélite IUE, sigla de International Ultraviolet Explorer. Se trata de un satélite astronómico situado en órbita geosíncrona que contiene un telescopio de 45 cm para espectroscopia. En alta resolución, los espectros de las emisiones estelares se obtienen hasta la duodécima magnitud, mientras que en resoluciones más bajas se han efectuado observaciones más débiles de decimoséptima magnitud.

las observaciones se dedican al estudio y a la investigación de cuerpos celestes muy débiles. En estos casos son necesarios tiempos de exposición bastante largos y, por tanto, la longitud y la consistencia de estas trazas son mayores. La probabilidad de que una de ellas pase exactamente por el punto en que se encuentra el objeto observado no es del todo despreciable. En este caso, la emisión luminosa del satélite puede cubrir la del objeto y hacerlo inobservable.

LOS PROBLEMAS PARA LOS OTROS SATÉLITES

Según algunas estimaciones, serían más de 40.000 los fragmentos de satélites inactivos de tamaño superior al centímetro cuadrado que hay en órbita alrededor de la Tierra. Aunque son de dimensiones reducidas, estos fragmentos constituyen verdaderas minas que vagan por los caminos de los satélites activos. Viajan a una velocidad del orden de 10 km/s y, por tanto, son verdaderos proyectiles que pueden perforar o provocar graves daños a los componentes más delicados de los satélites con los que chocan, como por ejemplo, los paneles solares. Es fácil imaginar los daños que se producirían en los satélites que han costado decenas de millones de dólares y están destinados a una vida operativa de varios años. Uno de los principales riesgos que corre el telescopio espacial Hubble es precisamente que un desecho espacial impacte contra su espejo principal y lo dañe, quedando inutilizable. Aunque no se trata de un acontecimiento frecuente, la posibilidad de que ocurra por lo menos una vez durante la vida operativa de una misión no es nada despreciable, teniendo en cuenta la elevada densidad de escombros que hay en las órbitas bajas. Esto ha sucedido algunas veces durante ciertas misiones de los transbordadores espaciales, afortunadamente sin graves consecuencias. El riesgo de colisión sólo es uno de los posibles problemas que presenta la presencia de estos restos espaciales frente a los demás satélites activos. Como hemos visto, son cuerpos bastante luminosos, por lo que pueden perturbar momentáneamente los sistemas de guía y de orientación de los otros satélites. La orientación y el apuntado de un satélite en órbita se efectúa utilizando como sistema de referencia la posición de algunas estrellas bastante brillantes. Los sensores de a bordo del satélite apuntan a algunas estrellas de referencia e indican al sistema de control las oportunas variaciones de la dirección del apuntado, incluso de pocas milésimas de segundo de arco. Cuando un cuerpo luminoso pasa por el campo visual de los sensores estelares, éstos pueden confundirse y empezar a seguir el intruso. Con esto se produciría una continua variación de la orientación del satélite.

¿CUÁNTOS SATÉLITES ARTIFICIALES HAY ALREDEDOR DE LA TIERRA?

Según los datos proporcionados por los radares del sistema estratégico de defensa de EE UU, serían al menos 6.000 los satélites artificiales de superficie superior a 1,5 m^2 situados actualmente en órbita alrededor de la Tierra. De ellos, los que aún están activos serían menos del 5%. El resto son satélites que ya llegaron al final de su vida operativa, partes de cohetes lanzadores usados, o residuos de satélites destruidos. Los satélites para telecomunicaciones son los más alejados, en cotas de 10.000 a 30.000 km. En cambio, los satélites científicos y militares están situados en cotas de algunos centenares de kilómetros.



Arriba, un dibujo que representa el ERS, Earth Resources Satellite, que efectúa detecciones destinadas a la geología, la hidrología y la oceanografía. Aquí está próximo a la órbita polar.



A la izquierda, el satélite Einstein. Así se rebautizó el anterior HEAO-2 lanzado por la NASA el 13 de noviembre de 1978.



EN EL PRÓXIMO NÚMERO

EL SISTEMA SOLAR

LOS MAYORES SATÉLITES JOVIANOS

ESTRELLAS Y GALAXIAS

LA FORMA DE LA VÍA LÁCTEA

GUÍA DE LAS CONSTELACIONES

EL ESCUDO

CÓMO FUNCIONA EL UNIVERSO

LA GRAVITACIÓN UNIVERSAL

LA EXPLORACIÓN DEL UNIVERSO

LA MISIÓN VOYAGER

EL UNIVERSO

ENCICLOPEDIA DE LA ASTRONOMÍA Y EL ESPACIO

24



9 788439 554219 00024

$ 3,90

PLANETA DeAGOSTINI



COMPOSICIÓN DE LA OBRA

Volumen 1	Fascículos 1	al	16
Volumen 2	Fascículos 17	al	32
Volumen 3	Fascículos 33	al	48
Volumen 4	Fascículos 49	al	64
Volumen 5	Fascículos 65	al	80

VENTA EN QUIOSCOS

Pida a su proveedor habitual que le reserve un ejemplar de EL UNIVERSO. Adquiriéndolo todas las semanas en el mismo punto de venta facilitará la distribución y obtendrá un mejor servicio.
Las tapas correspondientes a cada volumen se ponen a la venta con el fascículo que cierra el tomo. Con dicho fascículo se entregan las portadillas correspondientes.

Presidente: José Manuel Lara
Director General: Carlos Fernández
Director Editorial: Virgilio Ortega
Director General de Producción: Félix García
Coordinador General: Carles Dorico

© Editorial Planeta Argentina S.A.I.C.
Av. Independencia, 1668 - Capital Federal
Servicio de atención al cliente: Tel. (01) 482 - 0655 y 482 - 0657
Distribuye: Capital: Huesca-Sanabria,
Baigorri, 103, Capital Federal,
Interior: D.G.P., Alvarado, 2118, Capital Federal

© Editorial Planeta Mexicana, S.A. de C.V.
Av. Insurgentes Sur # 1162 - México D.F.
Servicio de atención al cliente: Tel. 575 13 48

© Editorial Planeta Colombiana, S.A.
Carrera, 68, n.º 25-55 - Santa Fé de Bogotá, D.C.
Servicio de atención al cliente: Tel. 9800 - 15315

© Editorial Planeta Chilena, S.A.I.C.
Olivares, 1229 - Santiago de Chile

ISBN Obra completa (con vídeo): 84-395-4148-1
Obra completa (sin vídeo): 84-395-4138-4
Fascículos (con vídeo): 84-395-4149-X
Fascículos (sin vídeo): 84-395-4139-2
Depósito legal: B-47.097-1997

Impresión: Cayfosa, Santa Perpètua de Mogoda, Barcelona
Impreso en España - Printed in Spain - Mayo 1998

Los editores se reservan el derecho de modificar el precio de venta de los componentes de la colección en el transcurso de la misma, si las circunstancias así lo exigieran.
Los editores garantizan la publicación de todos los fascículos que componen esta obra.

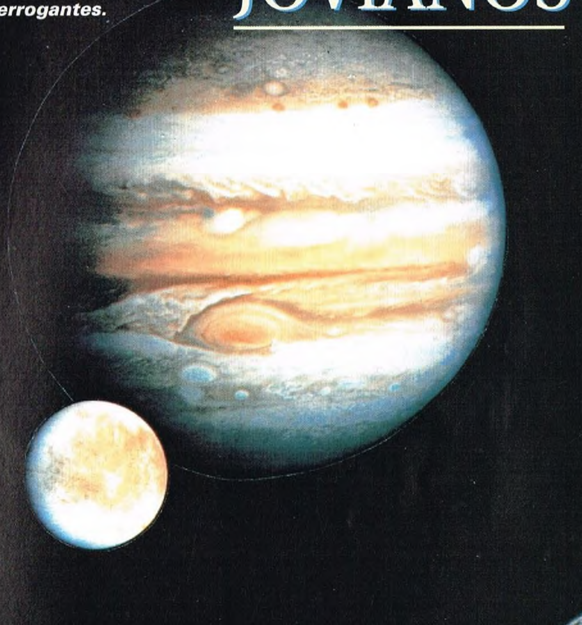
Fotografías: Lee Gibbons: cubierta, 116-117, 116ab., 117ar.; ESA/SPL: 107c.der.; E.T. Archive: 106ar.; Galaxy Picture Library: 101, 104, tercera de cubiertas; IGDA: 107ar.der.; Science Photo Library/Julian Baum: 106-107; Dr. Jeremy Burgess: 103 der.; Range: 111; Hugh Rowland: 110; Spectrum: 110, 111; US Naval Observatory: 112ar.izq.; Bristock-IFA: 114-115; BNSC/ESA: 118ab.; ESA: 118-119, 119ab., 120c.; Tony Stone Picture Library: 120ab.
Dibujos: Robin Carter/WLAA: 104-105, 117ab.; David A. Hardy: 102-103; Hugh Rowland: 105, 106ab., 120; Katz: 108-109; Sandra Russell/Black Hat: 112ar.; Julian Baum: 113; Farroxs: 116ar.; Robin Bottel: 115ab.; Spectrum Picture Library: 114ab.

LOS MAYORES SATÉLITES JOVIANOS

Los datos enviados por las sondas han dilucidado en parte la naturaleza de estos cuerpos, pero han abierto nuevos interrogantes.

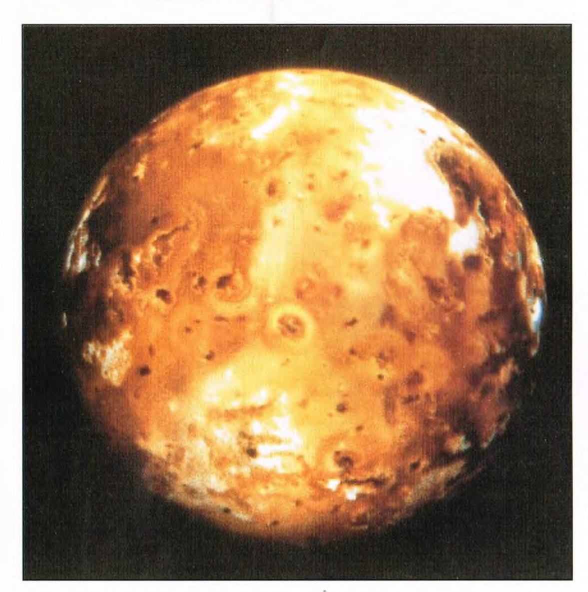
Entre los 16 satélites de Júpiter hasta ahora descubiertos, los cuatro observados por Galileo y dedicados por él a la familia Médicis, Ío, Europa, Ganimedes y Calisto, son los mayores por su tamaño e importancia. Estos satélites pueden alinearse a lo largo del ecuador de Júpiter con sus órbitas vistas de lado. Es posible observar que se mueven hacia delante y atrás sobre una misma línea (como el propio Galileo había ya observado) con la misma cara dirigida hacia Júpiter. Tres de las cuatro lunas son siempre visibles. La importancia de estos cuatro satélites de Júpiter reside en que fueron los primeros en descubrirse, después de la Luna, naturalmente.

Ío, Europa, Ganimedes y Calisto pertenecen a la familia de los objetos llamados terrestres, una familia que comprende Mercurio, Venus, la Tierra, la Luna y Marte. Estos satélites galileanos son parecidos por tamaño y composición a los cuerpos del sistema solar interno; por ello, los dos grupos de objetos han sufrido probablemente procesos evolutivos comparables y a escalas temporales similares. Uno de los resultados de las misiones Voyager ha sido que ha aumentado sensiblemente el número





De las cuatro lunas mayores de Júpiter al menos tres son siempre visibles simultáneamente.



A la izquierda, el suelo de Ío está formado por material de origen volcánico y las áreas blancas podrían ser depósitos de azufre.

de objetos similares a la Tierra con los cuales se pueden poner a prueba los modelos teóricos de evolución planetaria. Se sabía, por estudios realizados con telescopios desde la Tierra, que los satélites galileanos muestran ciertos comportamientos regulares, como la disminución de densidad y el aumento de tamaño en relación con la distancia a Júpiter, muy similares a los del sistema solar en su conjunto.

UNA PANORÁMICA

Ío, el satélite más próximo a Júpiter, era conocido por tener un tamaño y una densidad (3,5 g/cm^3) aproximadamente iguales que los de la Luna. A diferencia de los otros tres satélites, Ío no muestra la presencia de agua en el espectro a longitudes de onda del infrarrojo. Debido a su brillante coloración rojoanaranjada y a la brusca caída de su espectro cerca del ultravioleta, se pensó que su superficie era rica en azufre.

Europa, el segundo en orden de distancia a Júpiter, posee también el mismo tamaño que nuestra Luna pero es mucho más luminoso: refleja casi el 70% de la luz solar frente al 7% de la Luna (y al 35% de la Tierra). Los espectros correspondientes al infrarrojo próximo indican la presencia de una gran cantidad de hielo en la superficie del satélite. Estimaciones de su densidad (unos 3 g/cm^3) permiten suponer que Europa posee una corteza de hielo y de agua en estado líquido de unos 100 km de espesor.

El tercero y el cuarto de los satélites galileanos, Ganimedes y Calisto, son bastante similares. Se sabía que ambos tenían aproximadamente el tamaño de Mercurio y una densidad de unos 2 g/cm^3 (la de Mercurio y de la Tierra es de aproximadamente 5,5 g/cm^3). Por ello, se podía suponer que Ganimedes y Calisto eran todavía más ricos en agua que Europa, admitiendo que los tres están principalmente formados de agua y silicatos típicos (óxido de silicio). No obstante, Ganimedes refleja el 50% de la luz solar, contra el 20% de Calisto, lo que indica una mayor presencia de agua o hielo en su superficie.

EL SATÉLITE ÍO

La superficie de Ío muestra una multitud de extraños paisajes, con escarpaduras y fallas. Las fotografías transmitidas poco antes de la máxima aproximación del Voyager 1 dieron una explicación del proceso que pudo haber modificado la superficie del satélite. Una de tales fotos muestra una depresión volcánica circular de unos 50 km de diámetro rodeada de un precipicio y de largas coladas. El aspecto es el que ya se observa en otros cuerpos: una caldera, es decir, un enorme cráter de fondo llano formado al hundirse o explotar un aparato volcánico preexistente. En el hemisferio observado a alta resolución se han identificado más de 100 formas de este tipo, de dimensiones superiores a los 25 kilómetros.

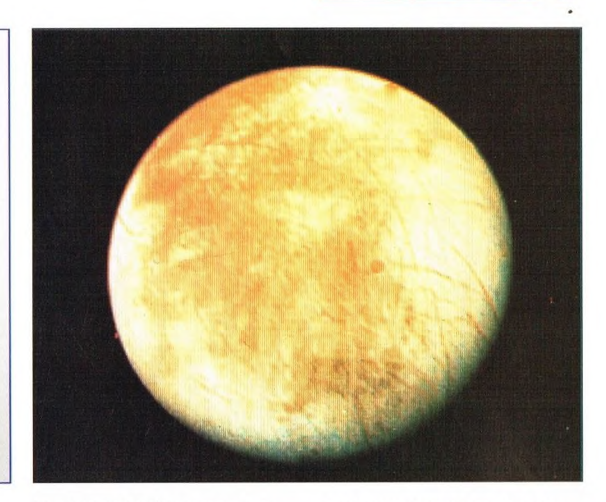
Las coladas que salen de los presuntos centros volcánicos son multicolores: negras, amarillas, rojas, anaranjadas y marrones. Estas coladas están probablemente formadas por basaltos coloreados de azufre o por azufre puro. Algunos científicos se han atrevido incluso a sugerir la existencia de lagos y mares de azufre. Pocos días después del encuentro del Voyager 1 con Júpiter, un investigador estaba analizando algunas imágenes de Ío tomadas a gran distancia para finalidades de navegación espacial. Al examinar una foto advirtió una gran forma luminosa fuera del borde del hemisferio meridional de Ío a unos 270 km de altura. Se trataba de una enorme nube debida a una erupción volcánica. Ulteriores investigaciones revelaron la existencia de nueve volcanes activos que lanzaban penachos hasta 300 km, con velocidades

A la derecha, un detalle de la superficie de Ío muestra la colada de un volcán que se distingue por su color más oscuro.



LOS VOLCANES DE ÍO

Ío, calentado por las fuerzas de marea de Júpiter, es el cuerpo más activo desde el punto de vista volcánico de todo el sistema solar. En su superficie están presentes varios géiseres volcánicos que lanzan penachos a cientos de kilómetros de altura. A causa del rozamiento debido a las fuerzas de marea, la superficie de Ío sube o baja cientos de kilómetros, lo cual produce calor que licúa el núcleo y provoca las erupciones. La superficie de Ío está cubierta de coladas lávicas, algunas recientes y otras más antiguas, que modifican la temperatura del terreno. Ésta, apenas ocurrida una erupción, pasa de 180 °C a 17 °C. El volcán principal hallado en actividad por las sondas es el volcán Pele, pero en el momento del paso de las Voyager otros nueve géiseres volcánicos estaban activos, lo que confirmó la continua turbulencia del satélite.



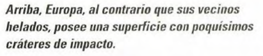
de 1 km/s. De los nueve penachos observados por el Voyager 1, siete estaban presentes todavía cuando llegó el Voyager 2 cuatro meses después. Evidentemente, los penachos están en continua erupción, y duran entre unos meses y unos años.

LAS MANCHAS BLANCAS

Otro fenómeno interesante de Ío es la presencia de brillantes manchas blancas o blancoazuladas a lo largo de las escarpaduras y las fallas que se observan en muchas zonas pero sobre todo en la región del polo Sur. Un reciente análisis espectrofotométrico de las imágenes del Voyager induce a creer que las regiones blancas podrían estar formadas por depósitos de dióxido de azufre y azufre.

Abajo, la capa de hielo que cubre Europa muestra largas fracturas (200-300 km), desde las cuales sale material al exterior.





Arriba, Europa, al contrario que sus vecinos helados, posee una superficie con poquísimos cráteres de impacto.

Se ha descubierto, además, que Ío posee una tenue atmósfera de dióxido de azufre que ejerce un presión de aproximadamente 1/10 de microbar.

La materia producida durante las erupciones volcánicas sale de la tenue atmósfera del satélite y constituye, en forma de partículas cargadas, un anillo que rodea Júpiter. Esta especie de rosquilla está dispuesta a lo largo del plano del ecuador magnético del propio Júpiter e influye notablemente sobre la dinámica de la magnetosfera del gigante gaseoso.

EUROPA

Europa era el más lejano de todos los satélites galileanos en la época de la máxima aproximación del Voyager 1 al sistema joviano; por ello, fue fotografiado con la mínima resolución. Las imágenes de esta primera sonda muestran un cuerpo casi blanco con trazas y figuras pálidas, y de bajo contraste. Su región ecuatorial muestra dos tipos de terreno: regiones oscuras y regiones brillantes, atravesadas ambas por bandas de decenas de kilómetros de anchura y probablemente de miles de kilómetros de extensión.

En las imágenes de alta resolución tomadas por el Voyager 2, las bandas resaltaban como un amplio trenzado de líneas. El terreno oscuro era en realidad

una sucesión de depresiones y altiplanos comunicantes de varios kilómetros.

La superficie de Europa tiene una edad comprendida entre varios cientos de millones de años y mil millones de años, y está recubierta por una costra de hielo que la alisa como una bola de billar.

Es muy probable que el agua, el principal componente volátil del satélite, haya subido a la superficie desde el interior y haya formado una gruesa capa de hielo que oculta todo relieve topográfico. Un manto de 100 km de espesor podría seguramente ocultar cualquier relieve existente sobre la litosfera de silicatos.

EL INTERIOR DEL SATÉLITE

Debajo de la costra de hielo debería de haber un núcleo rocoso más bien grande (más de 1.400 kilómetros).

Europa fue creado por una acumulación de material que giraba alrededor del Sol hace entre 4.000 y 5.000 millones de años, y sufrió un bombardeo meteorítico inicial análogo al de todos los demás cuerpos del sistema solar. Su aspecto actual está probablemente ligado a la evolución de la costra helada: si se hubiera helado y endurecido en las primeras fases de la vida del satélite, hoy en día serían visibles cráteres debidos al enorme número de meteoritos caídos. Su ausencia indica que el espesor de hielo se mantuvo blando durante largo tiempo, incluso después de la fase del bombardeo.



Arriba, imagen del disco de Ganimedes. Son visibles los cráteres de impacto que resultan más claros a causa de la gruesa capa de hielo que los cubre.



A la izquierda, las estructuras presentes en la superficie de Ganimedes son el resultado de la compresión de la corteza del satélite por parte de la capa de hielo.

Para explicar la larga duración del calor interno necesario para mantener blando el hielo se han invocado dos procesos. El primero se basa en la desintegración de sustancias radiactivas, consideradas como la única causa del calor presente en el núcleo del satélite. El segundo propone, como alternativa, un calentamiento por rozamiento similar al de Ío (aunque en menor grado) debido a las mareas producidas por la fuerza gravitatoria de Júpiter.

GANIMEDES

Ganimedes es el mayor de los satélites del sistema joviano y también el más brillante; sería el más fácilmente visible si su luminosidad no estuviera oscurecida por la de Júpiter. Se trata de una de las lunas más



grandes del sistema solar, con un diámetro sólo inferior al de Titán, satélite de Saturno, y al de Tritón, satélite de Neptuno.

También la superficie de Ganimedes está recubierta de una capa de hielo de más de 100 km de espesor; debajo habría una capa de material semisólido (probablemente fango y agua) de 500-600 km de espesor y, por último, el núcleo rocoso.

En Ganimedes se han identificado dos tipos distintos de terrenos que se suceden: uno rico en cráteres, que se extiende por muchas decenas de km^2, y otro, que rodea al primero, formado por regiones más jóvenes caracterizadas por acanaladuras con crestas y valles paralelos de edad variable, de hasta 15 km de anchura y de cientos de kilómetros de longitud. Un mecanismo para explicar la presencia de los surcos es el mismo que en la Tierra lleva a la emisión de material del manto por una fractura de la corteza terrestre. A lo largo de la evolución, en la superficie de Ganimedes se podrían haber formado algunas placas similares

Arriba, en esta imagen próxima de Calisto es visible el sistema de anillos concéntricos que se han desarrollado a partir de la cuenca central.

a las nuestras; estas placas, que inicialmente se movían unas encima de las otras, están ahora prácticamente inmóviles.

El suelo helado está sembrado de cráteres de todas las edades y parece más antiguo que el de Ío o Europa. Los casquetes polares se extienden hasta 40° de latitud norte o sur. Los polos son las zonas más frías porque no reciben directamente la luz del Sol; probablemente, el vapor de agua que escapa por las fracturas del suelo se ha condensado en estas regiones en forma de escarcha.

CALISTO

Calisto es el más exterior de los satélites galileanos y el que tiene menor densidad. Su suelo está caracterizado por innumerables cráteres que, aunque poco profundos, son más numerosos que los de cualquier otro cuerpo del sistema solar.

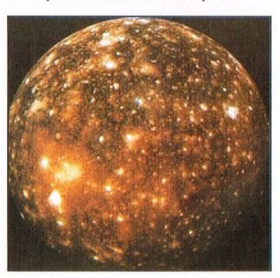
Dado que el suelo de Calisto no parece haber sufrido cambios sustanciales en los últimos miles de millones de años, se cree que esta luna posee la superficie más antigua del sistema solar.

En la parte más exterior hay una capa de hielo y rocas de unos 300 km de espesor, debajo de la cual debería de haber un manto de agua y hielo de unos 1.000 km; por último, habría un núcleo rocoso de unos 1.200 km de radio.

La superficie de Calisto, fotografiada por la sonda Voyager 1, aparece recubierta de cráteres. No obstante, su aspecto es distinto del de nuestra Luna porque en este caso no hay relieves en el borde brillante. La parte izquierda del hemisferio que mira a Júpiter está dominada por un sistema de anillos concéntricos en cuyo centro hay una cuenca circular de unos 600 km de diámetro. La densidad de cráteres de la zona interna de los anillos es mucho menor que la del resto de la superficie de Calisto. Lejos del centro del sistema, el número de cráteres vuelve a aumentar hasta que, en las regiones externas de los anillos, vuelve a ser similar al de todo el satélite.

La explicación más probable es que la cuenca se formó como consecuencia de la colisión con un cuerpo bastante grande; el enorme choque que produjo los anillos tuvo lugar cuando la costra del satélite todavía no era lo bastante rígida como para mantener la forma topográfica habitualmente asociada a las cuencas de colisión. Los anillos pudieron haberse formado de inmediato, o tal vez como reacción retardada respecto al momento de la colisión, del rebote de la región central del satélite y como fruto del ulterior reasentamiento de la superficie circundante; más tarde se solidificó la corteza de hielo, congelándose hasta grandes profundidades.

Abajo, Calisto es el cuerpo del sistema solar con mayor número de cráteres de impacto.



LA FORMA DE LA VÍA LÁCTEA

Nuestra Galaxia, la Vía Láctea, es una típica galaxia espiral, con grandes brazos de estrellas que se enrollan en torno al núcleo.



El espectáculo que se nos ofrece en una noche sin Luna y lejos de las luces parásitas de nuestras ciudades es el de una enorme concentración de estrellas en una parte bien precisa del cielo: la Vía Láctea. Pese a que el hombre ha observado el cielo desde siempre, la estructura de la Vía Láctea y sus auténticas dimensiones sólo se han determinado en el presente siglo.

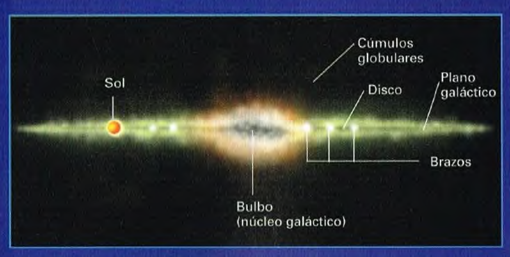
¿QUÉ ES LA VÍA LÁCTEA?

Todos nosotros, al observar el cielo nocturno, nos hemos percatado de la maravillosa presencia de la Vía Láctea, una banda blanquecina y difusa que atraviesa la esfera celeste. La Vía Láctea forma un auténtico anillo en el cielo, del que los habitantes de cada hemisferio ven sólo una parte. Esta estructura, que se nos aparece como una luz difusa, está formada en realidad por una multitud de estrellas debilísimas que el ojo humano no tiene la capacidad de distinguir. El primero en darse cuenta de ello fue Galileo cuando apuntó a la Vía Láctea con su anteojo. Este hormiguero de estrellas débiles es el disco de nuestra Galaxia tal como se nos aparece a nosotros, los que la miramos desde la Tierra.

EL DISCO DE NUESTRA GALAXIA

La Vía Láctea es una galaxia espiral, lo cual significa que está formada por un cuerpo principal en forma de disco sobre el cual se encuentran la mayor parte de las estrellas. El disco no tiene una morfología compacta; en él se pueden ver unas estructuras curvas que parten del núcleo para acabar en la periferia de la Galaxia: son los brazos espirales, las zonas de mayor densidad de materia galáctica, en los cuales se están formando nuevas estrellas a partir de nubes de gas y de polvo interestelar. En la zona central de esta estructura aplastada, que es el disco, se encuentra el núcleo galáctico. Alrededor del núcleo, formando una estructura con simetría

El panorama de la Vía Láctea es uno de los espectáculos más sorprendentes que es posible admirar contemplando el cielo en una noche serena y sin Luna.



esférica, está situado el halo, ocupado por las estrellas más viejas y por los cúmulos globulares, que son los sistemas estelares más antiguos de nuestra Galaxia. Estos cúmulos son muy fáciles de reconocer, pues su forma es esférica y tienen una densidad estelar muy elevada; se cuentan entre los objetos más extraordinarios que cabe observar con un telescopio. Nuestro Sol se encuentra precisamente en el disco, a una distancia de unos 28.000 años luz del centro de la Galaxia, lo cual significa que está situado en una posición periférica, a unos dos tercios del radio galáctico a partir del centro. Como estamos inmersos en la Galaxia y la miramos, por así decirlo, desde el interior, su disco nos aparece proyectado sobre la esfera celeste como una banda de estrellas (la Vía Láctea) y resulta difícil deducir su estructura real tridimensional a partir de las imágenes desde la Tierra. Es como cuando nos encontramos en una plaza llena de gente y no logramos entrever dónde termina el gentío.

Arriba, nuestra Galaxia está constituida por distintas estructuras: el halo es la región esférica ocupada por las estrellas más viejas y los cúmulos globulares; el disco (unos 100.000 años luz de diámetro), más reciente, está formado por la mayor parte de las estrellas de la Galaxia; el núcleo galáctico es la protuberancia central. En la figura se señala la posición periférica ocupada por nuestro Sol.

Desde nuestra posición nos será difícil establecer cómo está distribuida la gente en la plaza y hasta dónde se extiende en cada dirección la multitud de personas que se encuentran a nuestro alrededor. De no ser por los edificios que circundan y delimitan la plaza y que nos dan una idea del tamaño del ámbito en el que nos hallamos, estaríamos en serias dificultades para responder a alguien que nos preguntara por la extensión de la muchedumbre y por el lugar que ocupamos en ella. También el Sol se encuentra entre una multitud de estrellas, las que componen la Galaxia en que nos encontramos. Es por esta razón por lo que, pese a que el hombre contempla el cielo desde hace milenios, sólo en el presente siglo hemos empezado a hacernos una idea clara de la forma y las dimensiones de nuestra Galaxia.

HERSCHEL Y LA CAJA DE NUESTRA GALAXIA

Fue William Herschel el primer astrónomo que estudió científicamente la distribución de las estrellas en la esfera celeste, a fin de obtener información sobre la posición que el Sol ocupaba entre las estrellas. Herschel disponía de un telescopio de 48 cm de apertura, notable para la época. Con aquel instrumento comenzó en 1780 un programa de recuento sistemático de las estrellas visibles en el cielo. Dividió la esfera celeste en áreas cuadradas y, por medio de su telescopio, empezó a contar el número de estrellas que aparecían en cada región. A medida que Herschel iba observando zonas cada vez más próximas a la Vía Láctea, encontraba que el número de estrellas iba en aumento. Realizó, pues, un mapa sistemático del cielo del que extrajo informaciones fundamentales para deducir la forma real de nuestra Galaxia. En el análisis de los resultados de este inmenso trabajo de recuento, supuso que todas las estrellas tenían la misma luminosidad; así podía calcular su distancia. Las estrellas que parecían más débiles eran, según Herschel, más distantes de nosotros, y no menos luminosas que las demás. En realidad, esto no era cierto. Además, Herschel no tuvo en cuenta la absorción interestelar: antes de llegar a nosotros, la luz procedente de una estrella debe atravesar una capa de materia interestelar (gas y polvo) tanto más gruesa cuanto más distante es la estrella. El polvo que se encuentra entre nosotros y la estrella absorbe parte de la luz, de modo que una estrella 1, intrínsecamente más luminosa que otra 2 pero situada más lejos, puede parecer más débil que la 2 simplemente porque su luz sufre mayor absorción. A pesar de todo, a partir del mapa bidimensional del cielo Herschel logró reconstruir la estructura tridimensional del sistema de la Vía Láctea. Llegó a la conclusión de que la mayor parte de las estrellas estaban distribuidas por una estructura aplanada,

Abajo, la emisión en la banda radioeléctrica del espectro electromagnético por parte del hidrógeno neutro dibuja la forma de los brazos espirales.





M31 es una típica galaxia espiral. Así es como aparecería nuestra Galaxia si la miráramos desde el exterior.

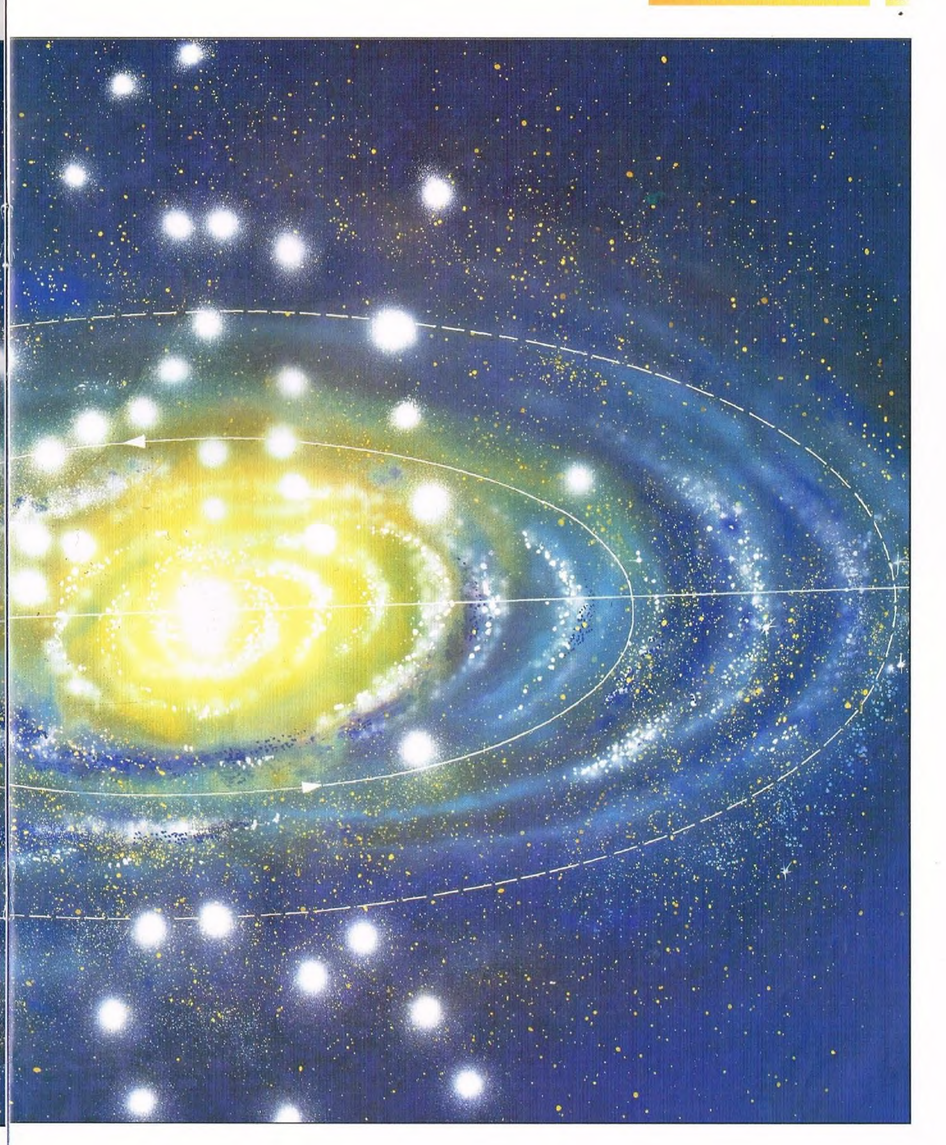
una especie de caja larga y estrecha, en el interior de la cual, junto a otras estrellas, se encontraba también el Sol. En realidad, ya el filósofo Immanuel Kant había sugerido en 1755 que la Vía Láctea tenía una morfología de tipo similar a la propuesta por Herschel. Fue, sin embargo, este último quien la fundamentó en bases observacionales. Los desarrollos subsiguientes se beneficiaron de la aplicación de la fotografía a la astronomía. David Gill, al fotografiar el gran cometa de 1882, se dio cuenta de que en sus fotos se advertían muchas estrellas que a simple vista no era posible ver. Esto le llevó a la convicción de que era necesario un nuevo mapa del cielo basado en imágenes fotográficas.

En los primeros años de nuestro siglo J. Kapteyn se interesó por el análisis de las placas fotográficas con el fin de remontarse a la estructura del universo partiendo de la distribución de las estrellas en el cielo. La mayor parte de los trabajos de recuento estelar fueron realizados en los años veinte. Kapteyn llegó a la conclusión de que nuestra Galaxia era un sistema aplanado casi centrado en el Sol, pues pensó que nuestro astro se encontraba sólo a 2.100 años luz del centro de la Galaxia.

En la imagen grande, representación pictórica de la Vía Láctea; el círculo a la izquierda indica la posición del Sol.

100.000 MILLONES DE ESTRELLAS

La Vía Láctea es una inmensa aglomeración formada por 100.000 millones de estrellas, la mayoría de las cuales están distribuidas por un disco achatado de unos 100.000 años luz de diámetro. Alrededor hay un halo exterior con los cúmulos globulares.



¿UN AGUJERO NEGRO EN EL CENTRO GALÁCTICO?

Se estima actualmente que el centro de nuestra Galaxia está a unos 28.000 años luz de nosotros. No es posible ver el centro galáctico porque el polvo y la materia interestelar absorben la radiación visible. Pero observaciones con ondas de radio, infrarrojas, rayos X y gamma brindan informaciones muy valiosas sobre lo que hay en esta zona. El centro galáctico coincide con una radiofuente llamada Sagitario A. Desde hace años, además, se detecta una emisión de rayos X y gamma procedente del centro galáctico. Estas observaciones han inducido a pensar que allí hay un agujero negro supermasivo. A favor de esta hipótesis parece militar la observación de la velocidad con que se mueven las estrellas en las proximidades del centro galáctico. Esta velocidad es tan elevada que sólo puede justificarse por el hecho de que las estrellas orbitan en torno a un agujero negro con una masa de varios millones de masas solares. Observaciones de 39 estrellas que se encuentran a menos de dos años luz de la fuente de radioondas realizadas desde el observatorio de La Silla, abogan por la presencia allí de un agujero negro de masa igual a unos dos millones y medio de soles concentrado en una extensión más pequeña que el sistema solar.



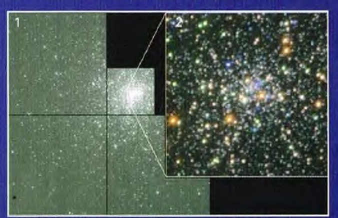
Arriba, fotografía de la región central de la Vía Láctea en la dirección de la constelación de Sagitario. Se ven muchas zonas oscuras, debido a la presencia de grandes cantidades de polvo interestelar.

LA ESCALA DEL UNIVERSO

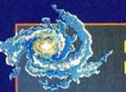
Históricamente, la determinación de las dimensiones de nuestra Galaxia fue un problema de primer plano, pues estaba estrechamente relacionado con el debate sobre las dimensiones del universo. ¿Nuestra Galaxia contiene todo el universo o sólo una parte? Se puede decir que la determinación de las dimensiones de nuestra Galaxia permitió el nacimiento de la astrofísica extragaláctica, la rama de la astrofísica que se ocupa de cuanto está en el exterior de nuestra Galaxia.

EL CENTRO DE LA GALAXIA

Harlow Shapley fue uno de los protagonistas del «Gran Debate» de aquellos años sobre la escala del universo. En 1914, Shapley comenzó a trabajar en el observatorio de Monte Wilson ocupándose de medir las distancias de los cúmulos globulares mediante la técnica de las variables cefeidas. Las cefeidas son unas estrellas pulsantes, lo que significa que cambian periódicamente de tamaño, expandiéndose y contrayéndose. El intervalo de tiempo durante el cual la estrella se contrae y se reexpande, volviendo a las condiciones de partida, se llama período de la pulsación. Dicho período está estrechamente ligado a la luminosidad intrínseca de la variable cefeida. Midiendo el período de variabilidad de la estrella es posible deducir su verdadera luminosidad y por ende la distancia a que se encuentra. Observando variables cefeidas que se encuentran en un sistema estelar es posible medir la distancia del propio cúmulo. Con este método Shapley midió las distancias de los cúmulos globulares y llegó a la conclusión de que estaban distribuidos en una estructura de simetría esférica en torno al centro galáctico. Así logró determinar también la distancia al centro de nuestra Galaxia, que valoró en unos 30.000 años luz, en la dirección de Sagitario. En su nueva concepción, la Galaxia resultaba mucho mayor de lo que se creía hasta entonces. Además, de sus medidas se deducía que el Sol no ocupaba el centro galáctico, sino que estaba situado a una cierta distancia de él. En consecuencia, el Sol no ocupaba ninguna posición privilegiada en el universo. La conclusión a la que llegó Shapley, a partir del análisis de la distribución de los cúmulos estelares, era correcta. Actualmente, se estima que el Sol se encuentra casi sobre el disco de la Galaxia, a unos 28.000 años luz del centro galáctico, y gira alrededor de él a una velocidad de unos 250 km/s, empleando unos 200 millones de años en completar una revolución. En 1923 Edwin Hubble, mientras estudiaba la nebulosa

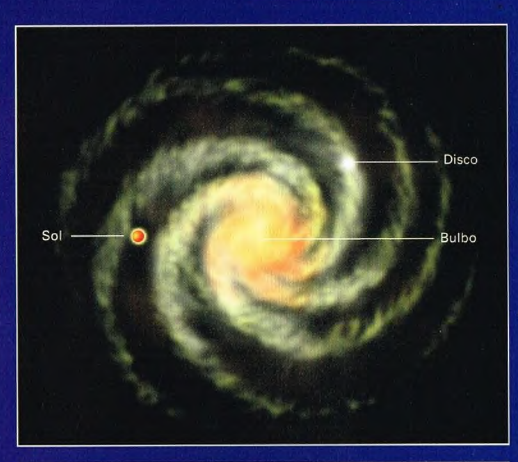


A la izquierda: 1) foto del cúmulo globular Omega Centauri; 2) ampliación de su región central. Los cúmulos globulares son los sistemas estelares más viejos de nuestra Galaxia porque se formaron en las primeras fases de contracción de la nube protogaláctica.



POBLACIONES ESTELARES

En función de la edad y de la composición química se pueden distinguir en nuestra Galaxia dos poblaciones estelares. La población I está compuesta por las estrellas más jóvenes y ricas en metales. Estas estrellas se encuentran en el disco galáctico y en los brazos espirales. La población II está constituida por las estrellas más viejas y pobres en metales, localizadas en el halo de la Galaxia y en los cúmulos globulares.En astrofísica se utiliza el término «metal» para designar cualquier elemento químico que no sea el hidrógeno o el helio.





de Andrómeda, estimó su distancia a nosotros en más de un millón de años luz, lo cual la situaba fuera de nuestra Galaxia. En 1930, Trumpler, examinando la luminosidad de las estrellas de algunos cúmulos abiertos, descubrió el fenómeno de la absorción que sufre la luz al atravesar la materia interestelar. Esto contribuyó de manera importante a la estimación de las distancias y por tanto a la determinación de las dimensiones reales de la Galaxia.

LA FORMA ESPIRAL

Ya en 1903, sobre la base de un mapa de la Vía Láctea, Easton había sugerido la posibilidad de que nuestra Galaxia tuviese una forma espiral. Esta hipótesis fue retomada por Baade en 1950 a partir de estudios relativos a las poblaciones estelares y a su edad. En particular, los brazos espirales estaban poblados de objetos muy luminosos y jóvenes. Por último, Morgan demostró la existencia de los brazos espirales en las proximidades del Sol. Más recientemente, la forma espiral de nuestra Galaxia ha sido puesta de manifiesto por el estudio de la distribución del hidrógeno neutro en el plano galáctico, tal como se deduce de la radiación a la longitud de onda de 21 cm emitida por este gas. A partir del análisis de esta emisión se ha logrado reconstruir un mapa de la distribución del hidrógeno en nuestra Galaxia que ha revelado una típica forma espiral. Los brazos espirales son zonas en las cuales se encuentra una mayor densidad de gas y por tanto donde es posible que se formen nuevas estrellas a partir de la materia interestelar. A los brazos espirales, en efecto, pertenecen las estrellas más jóvenes, las de clase espectral O y B, agrupadas en asociaciones.

Arriba, dibujo de la Vía Láctea vista desde arriba. Alrededor del núcleo se enrollan varios brazos espirales.

En la imagen superior, la galaxia M51 de los Perros de Caza. Se llama Whirlpool Galaxy por su característica forma (en inglés whirlpool *significa remolino).*



A la izquierda, sección de la Vía Láctea tal como la imaginó Herschel sobre la base de su mapa celeste.

EL ESCUDO

La constelación del Escudo de Sobieski, aunque poco aparente, está situada en una de las regiones más luminosas de la Vía Láctea.



El Escudo de Sobieski está formado por unas pocas estrellas escasamente luminosas, entre las constelaciones del Águila, de Sagitario y la Cola de la Serpiente. El plano galáctico atraviesa este pequeño asterismo.

CÓMO LOCALIZAR LA CONSTELACIÓN

El modo tal vez más cómodo para identificar la constelación del Escudo consiste en recorrer la Vía Láctea hacia el sur tomando como referencia la constelación del Cisne: la dirección determinada por las estrellas Alpha (Deneb) y Beta (Albireo) de esta constelación apunta *grosso modo* hacia el débil asterismo próximo a Sagitario.



LOS MITOS Y LAS ESTRELLAS

EL ESCUDO

Pese a haber sido observada desde la Antigüedad por pueblos cuyas tradiciones han llegado a nosotros, la constelación del Escudo de Sobieski fue introducida en tiempos relativamente recientes. Quien le dio nombre fue Johannes Hevelius, en 1684, para recordar al rey polaco Juan Sobieski III, el cual, después del incendio que destruyó el observatorio del gran astrónomo, le ayudó en la reconstrucción. Anteriormente, las estrellas de esta constelación formaban parte del Águila, pero Hevelius, para expresar su gratitud a su benefactor, definió un nuevo reagrupamiento. La referencia al escudo del soberano deriva de que éste fue uno de los que más combatió para contrarrestar el avance de los sarracenos en Europa.

ESTRELLAS PRINCIPALES

Hay muy poco que decir acerca de las escasas estrellas del Escudo, todas de magnitud igual a cuatro o superior. La más brillante de la constelación es Alfa (magnitud 3,9), una estrella de luz amarilloanaranjada que dista de nosotros unos 200 años luz. Delta es una estrella poco aparente si se observa a simple vista, aunque es importante porque representa el prototipo de una clase particular de estrella variable. Este tipo de astros son variables rápidas, que muestran pequeñas oscilaciones de luminosidad con períodos inferiores al día. Delta *Scuti* pasa de una magnitud 4,6 a una magnitud 4,8 en unas cuatro horas. También R *Scuti* es una estrella con luminosidad variable aunque, a diferencia de Delta, sus oscilaciones de magnitud son menos regulares, pese a presentar una periodicidad de unos 150 días. En este lapso de tiempo pasa de la magnitud 4,2 a la 8,6 y parece desaparecer: cuando su luminosidad es máxima es perceptible a simple vista mientras que cuando es mínima requiere la ayuda de unos prismáticos.



Arriba, el cúmulo abierto M11 es perceptible con unos prismáticos cerca de la estrella Beta. Su forma recuerda una bandada de patos salvajes en vuelo.

OBJETOS DEL ESCUDO

Dada su posición en el interior de la Vía Láctea, el Escudo es una constelación rica en objetos observables con un telescopio pese a ser una de las más pequeñas de la bóveda celeste. Entre los objetos presentes en esta constelación hay que mencionar dos del catálogo de Messier: M11 y M26. Ambos son cúmulos abiertos al alcance de unos prismáticos corrientes.

M11 se puede reconocer por su forma característica porque la disposición de las estrellas que lo forman recuerda una bandada de patos en vuelo. M11 está formado por un centenar de estrellas. M26, situado cerca de Delta, es un poco más pequeño y menos luminoso que M11; brilla como un cuerpo de novena magnitud y muestra una veintena de estrellas. Las distancias de estos dos objetos son comparables, de unos 5.000 años luz.

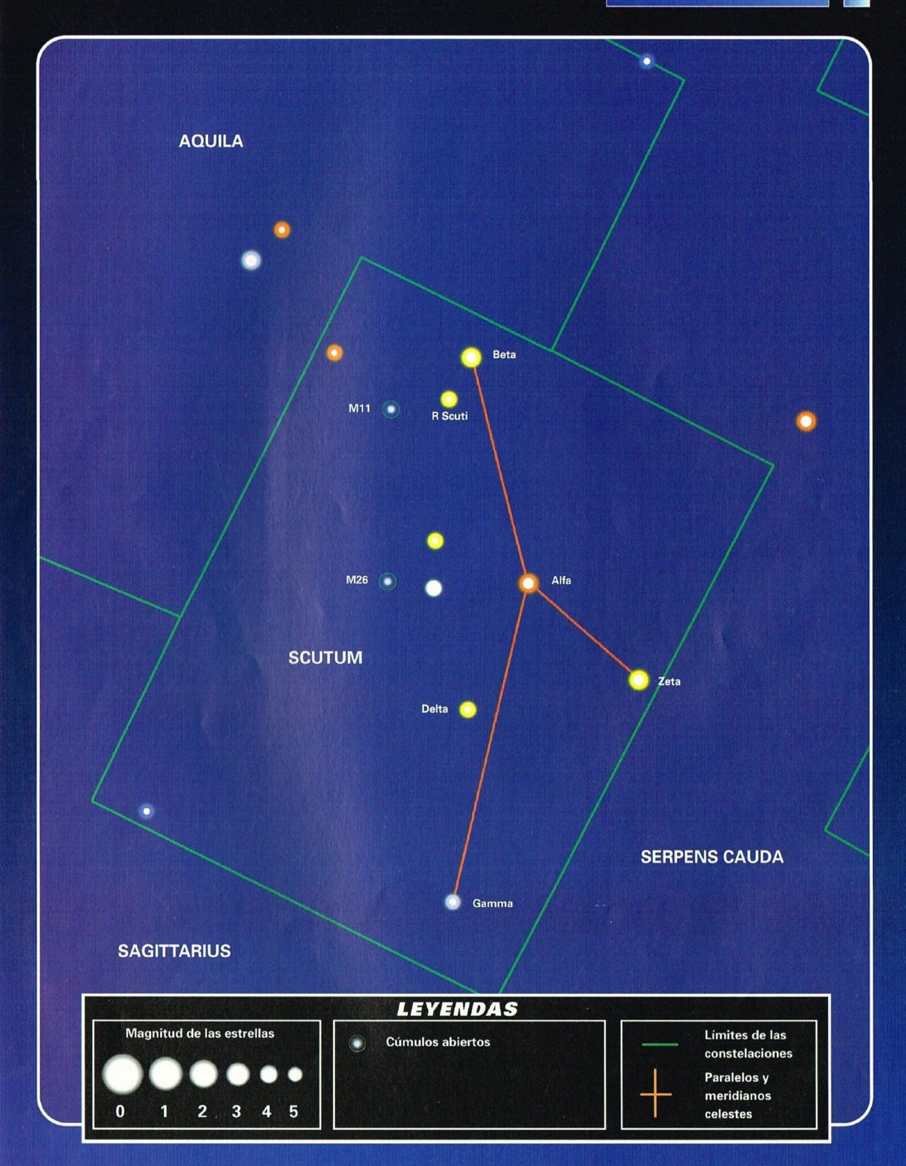


El Escudo es una de las pocas agrupaciones del cielo introducidas después de la Antigüedad clásica, época a la que se remonta la mayor parte de las constelaciones visibles desde el hemisferio boreal. Fue definido por Hevelius en honor de su rey.

DÓNDE BUSCARLA

EL ESCUDO

La constelación del Escudo de Sobieski abarca una región del cielo comprendida entre 4° S y 16° S de declinación, y entre 18 horas 20 minutos y 18 horas 55 minutos de ascensión recta.
Es íntegramente visible todo el año desde latitudes más al sur que 86° S y parte del año desde las regiones comprendidas entre 86° S y 74° N. Por encima de 74° N nunca es enteramente visible. Dado que la constelación está próxima al ecuador, si se observa desde latitudes como la de España será visible a unos 40° sobre el horizonte cuando se encuentra en dirección sur. El paso por el meridiano a media noche, y por lo tanto la oposición al sol, se produce a comienzos de julio.


AQUILA
Beta
M11
R Scuti
M26
Alfa
SCUTUM
Zeta
Delta
SERPENS CAUDA
Gamma
SAGITTARIUS
LEYENDAS
Magnitud de las estrellas
0 1 2 3 4 5
Cúmulos abiertos
Límites de las constelaciones
Paralelos y meridianos celestes

LA GRAVITACIÓN UNIVERSAL

La teoría de Newton inauguró una nueva concepción del mundo que hizo nacer la esperanza (o el temor) de poder explicar científicamente todos los fenómenos naturales. Pese a los tres siglos transcurridos desde su formulación, la ley de la gravitación se utiliza todavía para programar los vuelos espaciales.

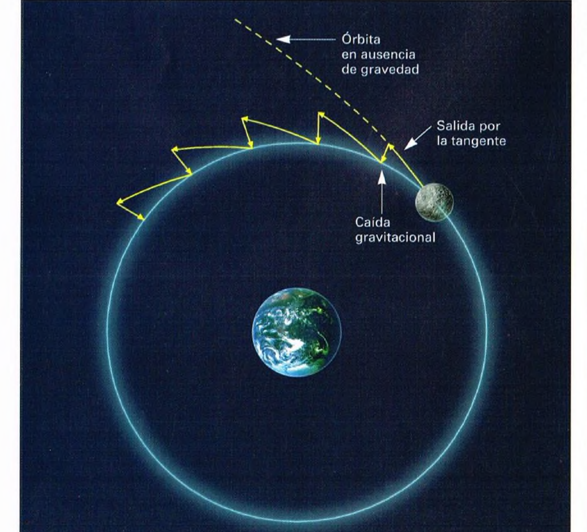


En 1687 Newton publicó *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Era la respuesta a la cuestión suscitada por Halley, sobre qué tipo de órbitas podía recorrer un objeto sometido a un campo de fuerzas de intensidad inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a un punto.

No era una demanda casual, el debate científico de la época se había ya iniciado y Newton conocía la respuesta. La impresión que ejerció dicha respuesta sobre el mundo científico de entonces fue enorme, hasta el punto de que la hipótesis newtoniana ha sido considerada por muchos como el acontecimiento más importante de los tiempos modernos.

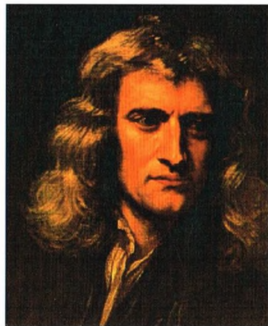
LA SÍNTESIS NEWTONIANA

Muchas eran las consideraciones que habían llevado a Newton a establecer su teoría de la gravitación universal. Las leyes que regulaban el movimiento de los planetas habían sido formuladas por Kepler, pero



A la izquierda, un cuerpo que se deja caer cerca de la Tierra recorre unos 5 m en vertical en el primer segundo. La aceleración de la gravedad, en efecto, vale 9,8 m/s². Dada la ley de la gravitación universal y teniendo en cuenta que la Luna dista de nosotros unos 60 radios terrestres, la aceleración a la distancia de la órbita lunar debería ser de 1/3.600 de 9,8 m/s², es decir, de 0,00274 m/s². En estas condiciones la Luna debería caer 0,00138 m en un segundo. Y esto es lo que efectivamente ocurre. Su caída de 0,00138 m contrarresta exactamente el alejamiento que la Luna sufriría si, en ausencia de la atracción terrestre, estuviera en libertad de viajar en línea recta siguiendo la tangente.

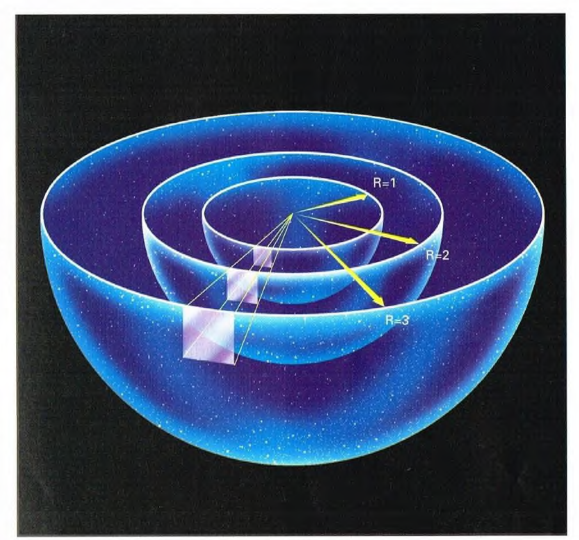
Abajo, Isaac Newton (1642-1727), en un retrato que lo representa cuando sucedió a Isaac Barrow en la cátedra de matemáticas de la Universidad de Cambridge.



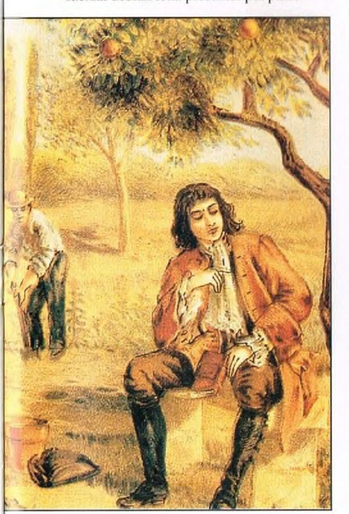
nadie había explicado por qué aquellas tres leyes eran la manera correcta de predecir el movimiento planetario. Además, la dinámica, bajo el impulso de los estudios de Galileo, había llegado a una formulación precisa, también debida a Newton, que todavía hoy constituye la base de la enseñanza elemental de la física. Se habían identificado las fuerzas como las causas de la desviación del movimiento rectilíneo recorrido con velocidad uniforme que poseen todos los cuerpos aislados de cualquier otro objeto. La masa m, magnitud característica de cualquier cuerpo, determinaba la aceleración a producida por la fuerza F de acuerdo con la relación $a = F/m$.

La importancia de la contribución de Isaac Newton consistió en un intenso trabajo de síntesis que consiguió reunir muchos fenómenos físicos bajo un único modelo. Las leyes de la mecánica newtoniana regulaban los movimientos de los cuerpos observados en la Tierra. La idea nueva consistió en aplicar también dichas leyes al movimiento de los planetas. Ya no era necesario suponer intervenciones divinas para mantener los planetas en sus órbitas celestes. Al contrario, debía existir alguna fuerza que obligaba a los planetas a seguir trayectorias curvas (circunferencias o elipses) y a no proceder en línea recta como lo hacen los objetos no sometidos a ninguna fuerza externa. Además, debido a la tercera ley de la mecánica, estas fuerzas debían estar presentes por pares de fuerzas iguales y opuestas. Newton introducía así el concepto moderno de la física de las interacciones, en la cual las fuerzas existen sólo cuando dos cuerpos interactúan.

Dado que en los planetas no se habían observado nunca choques o fenómenos similares que pudieran hacer nacer estos pares de fuerzas, había que pensar en un tipo de fuerza que actuara a distancia: en la Tierra eran conocidos y habían sido estudiados los fenómenos de la atracción magnética y de la caída de los cuerpos masivos a la superficie terrestre. La asociación entre los cuerpos inevitablemente atraídos hacia la Tierra y la idea de que la Luna también debía caer probablemente indujo a Newton a tratar de medir cuál era la atracción terrestre sobre la Luna.



Arriba, esferas de luz, sonido o energía que se expanden aumentando su área en proporción al cuadrado del radio de la esfera. La correspondiente intensidad debe disminuir cuando la esfera se expande porque la misma cantidad de luz (sonido, energía) se distribuye por un área mayor. La gravedad se comporta del mismo modo pese a que su origen es desconocido.



A la izquierda, el dibujo representa a Newton meditando sobre la célebre caída de la manzana. Según la tradición, el episodio, del todo casual, lo indujo a profundizar en la ley de la gravitación.

LA EXPLICACIÓN DE LAS LEYES DE KEPLER

Newton demostró que si el Sol, en el centro, ejercía una fuerza inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al propio Sol, las órbitas de los planetas, o de otros objetos cualesquiera, debían ser elipses o unas figuras geométricas denominadas cónicas. Con tal objeto elaboró una nueva rama de las matemáticas que hoy en día llamamos análisis y que Newton denominó teoría de fluxiones. Esta nueva teoría resultaría el instrumento más poderoso a disposición de la nueva ciencia racional que se desarrolló en los siglos de la Ilustración y de la revolución industrial. Las leyes de Kepler, hasta entonces carentes de explicación, fueron deducidas de una única ley, según la cual en el sistema solar actúa una única fuerza dirigida hacia el centro, donde se encuentra el Sol. Su intensidad, además, debía seguir la ley $F = k/r^2$, donde r es la distancia al Sol y k una constante universal.

LA GRAVITACIÓN UNIVERSAL

La filosofía científica newtoniana se basaba en una idea simple sobre la naturaleza:



Arriba, imagen del espectacular cometa Halley, cuya trayectoria fue calculada por el astrónomo de mismo nombre utilizando las ecuaciones de Newton.

la de que con pocos elementos se construyen múltiples formas y que las explicaciones requeridas se basan en leyes simples. Newton tendía también a atribuir a los cuerpos directamente inalcanzables las mismas propiedades que los cuerpos conocidos.

Por ello, la gravitación explica al mismo tiempo el movimiento de los planetas y de los satélites de Júpiter, observados por primera vez con el anteojo de Galileo. El siguiente gran paso de la síntesis newtoniana fue la deducción de los fenómenos celestes y de la caída de los graves observada en la Tierra a partir de un único principio explicativo. Por primera vez, el mundo pasaba a ser uno solo, sin la distinción entre el cielo y la Tierra propia de la tradición medieval, y el factor unificador era la atribución de una masa a todos los cuerpos: a la manzana que cae, a la Tierra que atrae los cuerpos hacia su centro, al Sol que con su acción gravitatoria mantiene los planetas en sus órbitas. Para probar esta idea Newton calculó la atracción que debe sufrir la Luna considerándola sujeta a la misma gravedad que hace caer los objetos en la Tierra. Los resultados de sus cálculos le indujeron a escribir en los *Principia* que había «encontrado una correspondencia muy buena».

LOS ÉXITOS DE UNA BUENA TEORÍA

La gravitación crea así un mundo de fuerzas generado exclusivamente por la presencia de masas. La distribución de estas masas en el mundo circundante y en el universo moldea la forma de cuanto podemos observar e incluso de lo que, con los medios a nuestro alcance, no podemos ver.

Newton se dio cuenta de que las mareas son un efecto de la fuerza de atracción gravitacional de la Luna. Dado que los dos lados de la Tierra están situados a diferente distancia de la Luna, el más alejado será menos atraído; por ello, el agua se separa de la Tierra en el lado más próximo a la Luna, mientras que la Tierra se separa del agua en el lado opuesto.

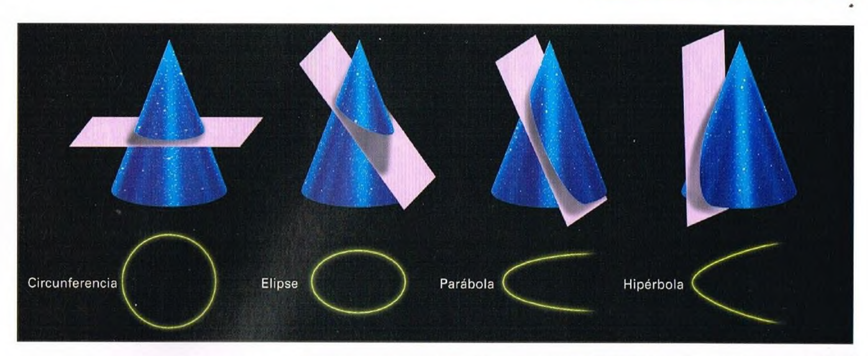
Pero fue en el espacio donde la gravedad mostró sus efectos más espectaculares. Halley utilizó las ecuaciones de Newton para calcular la órbita de un cometa que ya había aparecido muchas veces y había sido observado por última vez en 1607. Halley predijo el retorno del cometa pero murió antes de poderlo ver: el cometa, que hoy lleva su nombre, ha aparecido puntualmente cada 76 años. Incluso la forma de los planetas, que observados al telescopio no son esferas perfectas sino globos achatados en los polos, encuentra una explicación en el siguiente supuesto: la gravedad es la fuerza que mantiene junta la materia de todo planeta, incluida la Tierra. A causa de la fuerza centrífuga de un planeta en rotación, la fuerza de atracción gravitacional es menos eficaz en el ecuador, donde la velocidad de rotación es mayor, y el resultado es el achatamiento polar de los cuerpos celestes. La diferencia entre los radios ecuatorial y polar de la Tierra (respectivamente 6.378 y 6.357 km) fue medida por primera vez en tiempos de Newton.

APLICACIONES PRÁCTICAS DE LA TEORÍA

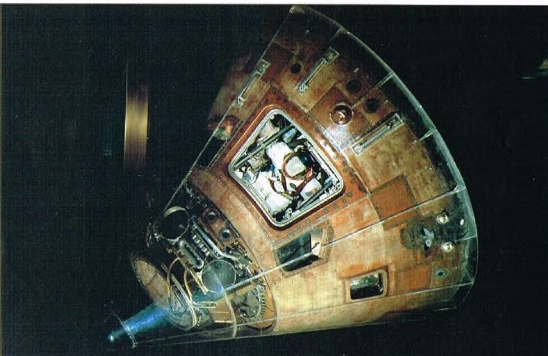
En los últimos decenios del siglo XVIII, las medidas de la posición de los planetas más externos, Júpiter y Saturno, fueron tan precisas que resultó obvia su discrepancia respecto a los cálculos teóricos. Mientras parecían cuestionarse la exactitud y la universalidad de la gravitación newtoniana se abrió paso la hipótesis de un nuevo planeta, que con su masa podía influir en

También para proyectar viajes espaciales se utilizan las nociones sobre la gravitación universal. Aquí, Gregory Jarvis, del STS 51-D, realiza ejercicios en condiciones de ingravidez.





Arriba, las cónicas son unas figuras geométricas planas que se pueden obtener cortando con un plano un cono de longitud infinita. El parámetro que las caracteriza se llama excentricidad. Las órbitas en un campo de fuerzas centrales que varían como $1/r^2$ sólo pueden ser figuras de este tipo. Las órbitas circulares o elípticas se llaman cerradas, mientras que las parábolas y las hipérbolas son órbitas abiertas. Un objeto que se acerca al Sol a lo largo de una órbita abierta después de alejarse no vuelve a pasar nunca por la parte central del sistema solar.
A la derecha, una imagen tomada desde el espacio, del módulo de mando del Apolo 11.



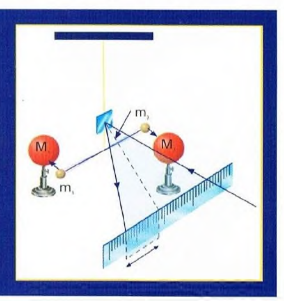
el movimiento de los demás. Con el auxilio de las leyes de Newton se pudo estimar la posición y el tamaño del nuevo cuerpo celeste, al cual se dio el nombre de Urano y que fue descubierto en 1781 por William Herschel. El descubrimiento de Neptuno y Plutón tuvo lugar de modo similar, y los dos planetas fueron observados por primera vez en 1846 y 1930 respectivamente. Actualmente, los innumerables satélites artificiales siguen órbitas dictadas por las mismas leyes de la gravitación. La seguridad con que se proyectan los viajes espaciales lunares o interplanetarios proviene de la exactitud de la fórmula que expresa la fuerza de atracción gravitacional entre dos cuerpos de masas M_1 y M_2 situados a una distancia r: $F = G \cdot M_1 \cdot M_2 / r^2$. La constante G se llama constante de la gravitación universal.

EXPERIMENTO

LA MEDIDA DE G

El experimento de Henry Cavendish (1731-1810) estuvo dedicado a la determinación del valor de la constante de la gravitación universal. El aparato de la figura muestra cómo la masa de dos esferas grandes atrae las esferas pequeñas. Cavendish midió una torsión del hilo del cual están suspendidas las pequeñas esferas. La medida de G (que vale $6{,}67 \cdot 10^{-11}$ N·m²/kg²) es fundamental para poder determinar la masa del cuerpo alrededor del cual se observa orbitar un objeto (satélite, planeta). De este modo, es posible, observando el período de revolución de la Luna y su distancia, deducir la masa de la Tierra.

A la derecha, la atracción gravitacional entre las masas M_1 y m_1, de una parte, y entre las masas M_2 y m_2, de otra, produce una torsión de la barra a la cual están sujetas las masas más pequeñas. El ángulo de torsión, medido por medio del espejo que se encuentra en el centro del dibujo, permite deducir la fuerza ejercida y por tanto calcular G.



LA MISIÓN VOYAGER

DOS JOYAS TECNOLÓGICAS ENTRE LOS PLANETAS DEL SISTEMA SOLAR

Con las sondas Voyager 1 y 2 se ha realizado un auténtico viaje de exploración espacial. Después de haber sobrevolado los grandes planetas gaseosos y de haber recogido una excepcional cantidad de datos, las sondas han alcanzado los confines del sistema solar.



Mientras tomaba cuerpo el programa Pioneer hacia Júpiter y Saturno, en la NASA se pensaba ya en otra empresa todavía más fascinante: gracias a una especial alineación de los planetas del sistema solar que tiene lugar cada 175 años era posible realizar un reconocimiento de todos los planetas externos, de Júpiter a Plutón. Se pensó en dos sondas para sobrevolar Júpiter, Saturno y Plutón, y otras dos para sobrevolar Júpiter, Urano y Neptuno. Pero los altos costes de semejante empresa hicieron que la expedición quedara limitada a dos únicas sondas, llamadas Voyager, la primera de las cuales tenía que sobrevolar Júpiter y Saturno, mientras que la segunda tenía que situarse en una trayectoria que la llevaría a las cercanías de Urano y Neptuno. Sólo el planeta Plutón quedaría al margen de estas aproximaciones.

DOS SONDAS GEMELAS

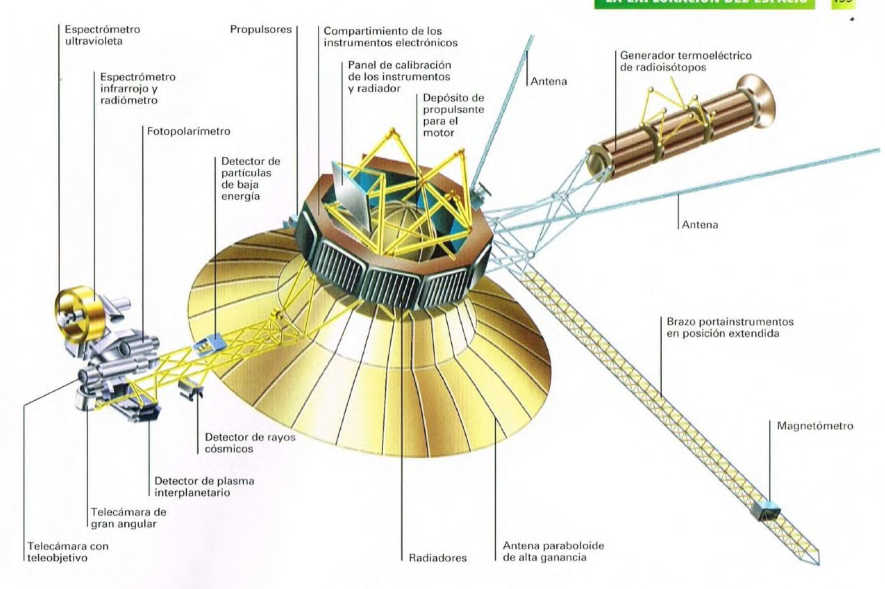
Las dos sondas gemelas Voyager 1 y Voyager 2 fueron lanzadas desde cabo Cañaveral, en Florida, el 5 de septiembre de 1977 y el 20 de agosto de 1977, respectivamente. Ambas fueron llevadas al espacio por un cohete Titan-Centaur. La especial alineación de los planetas permitió a las sondas Voyager pasar de uno a otro planeta mediante la técnica de la *gravity assist*, la fuerza gravitatoria de cada planeta, para adquirir la velocidad de aproximación al planeta siguiente. Ello permitió un gran ahorro de carburante. La órbita se eligió entre unas 10.000 candidatas. El plan de vuelo del Voyager 1 la llevó a la menor distancia posible de Júpiter el 5 de marzo de 1979 y de Saturno el 12 de noviembre de 1980, permitiéndole también estudiar de cerca Titán, la gran luna de este último. Luego la sonda prosiguió hacia el norte, respecto al plano de la eclíptica, con un ángulo de unos 35° y una velocidad que le permitía recorrer unos 520 millones de km anuales. La trayectoria de la sonda Voyager 2 la llevó a sobrevolar Júpiter el 9 de julio de 1979 y Saturno el 25 de agosto de 1981, para llegar a Urano el 24 de enero de 1986 y a Neptuno el 25 de agosto de 1989. El Voyager 1, mientras tanto, siguió enviando imágenes a la Tierra desde el espacio que iba atravesando: fue la primera sonda que alcanzó la heliopausa, el límite entre la parte externa del campo magnético del Sol y el inicio del espacio interestelar. También el Voyager 2, después de haber sobrevolado Neptuno, ha abandonado la eclíptica aunque dirigiéndose hacia el sur respecto a esta última con un ángulo de 48° y una velocidad capaz de hacerle recorrer anualmente 470 millones de km. Ahora, después de haber llevado a término con gran éxito la misión planetaria, estas sondas han pasado a formar parte del nuevo proyecto denominado Misión Voyager Interestelar. Se cree que las sondas podrían seguir recogiendo datos y enviándolos a los científicos de la Tierra durante 20 o 30 años.



Arriba, el despegue de la sonda Voyager, lanzada por un cohete Titan-Centaur.

Abajo, la sonda Voyager mientras pasa cerca de Júpiter en una reconstrucción artística.





Arriba, un minucioso dibujo que representa la estructura y los instrumentos de la sonda Voyager.

Las comunicaciones se mantendrán por medio del generador de energía atómica de a bordo.

CARACTERÍSTICAS DE LAS SONDAS

Las dos sondas gemelas pesaban 825 kg, de los cuales 105 correspondían a los instrumentos de a bordo, destinados a realizar 10 experimentos. También llevaban máquinas fotográficas, sensores ultravioletas e infrarrojos, magnetómetros, detectores de plasma y sensores de rayos cósmicos y partículas cargadas. Al tener que viajar y operar a millones de kilómetros del Sol, no era concebible el uso de paneles solares como fuente de energía. Por ello, las sondas estaban alimentadas por un generador radioisotópico termoeléctrico que transformaba el calor, producto de la desintegración radiactiva del plutonio, en energía capaz de mantener en funcionamiento los instrumentos de a bordo, los ordenadores, las radios y los demás sistemas. Las sondas eran controladas a través del Deep Space Network del JPL de la NASA, cuyas instalaciones se encuentran en el desierto Mojave (California), cerca de Madrid (España) y en Tibdinbilla, cerca de Canberra (Australia).

JÚPITER

El Voyager 1 sobrevoló Júpiter a una altura mínima de 206.700 km respecto a las nubes del planeta, mientras que el Voyager 2 pasó a 570.000 km de altura. Aunque los astrónomos habían estudiado el planeta desde hacía siglos, los científicos quedaron sorprendidos por los innumerables descubrimientos realizados por las sondas Voyager. La Gran Mancha Roja resultó ser un complejo huracán que se movía en dirección antihoraria, acompañado de innumerables tempestades más pequeñas. El descubrimiento de un vulcanismo activo en el satélite Ío fue, de todos modos, el hallazgo más interesante realizado en el sistema joviano. Era la primera vez que se observaba un volcán activo en un cuerpo del sistema solar que no fuera la Tierra. El material, eyectado a una velocidad de varios kilómetros por segundo, ascendía hasta unos 300 km de altitud y permeaba toda la magnetosfera de Júpiter, la región del espacio que rodea el planeta influida por el campo magnético. El satélite Europa mostró por primera vez a una telecámara sus complejas estructuras superficiales que aparecen sobre una delgada corteza de hielo y que fueron estudiadas en profundidad por la sonda Galileo. Ganimedes, con sus 5.276 km de radio, resultó ser una de las mayores lunas del sistema solar. Las sondas Voyager descubrieron dos tipos de terreno, uno craterizado y el otro hecho de surcos y relieves que probó la existencia de fuerzas tectónicas todavía activas. Calisto demostró tener una vieja corteza craterizada por enormes impactos de asteroides.
Los Voyager descubrieron que también alrededor de Júpiter había un delgado anillo de polvo, que se extendía desde 30.000 km de distancia a la superficie del planeta hasta 129.000 km. Dos nuevas pequeñas lunas, Adrastea y Metis, fueron descubiertas fuera del anillo. Un tercer nuevo satélite, Tebe, fue hallado entre las órbitas de Amaltea e Ío.

SATURNO

El Voyager 1 sobrevoló Saturno a 64.200 km mientras que el Voyager 2 se acercó a 41.000 km de sus nubes. Tal vez la mayor sorpresa vino de los anillos de Saturno. Se creía que estaban formados por la disgregación de grandes lunas que rodeaban Saturno, que habían sido golpeadas y fragmentadas por asteroides y cometas. Como resultado, se habría

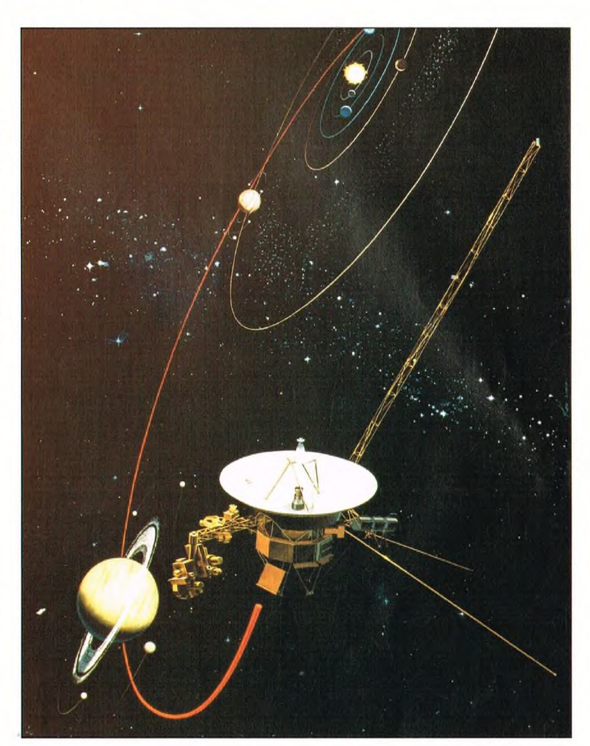
formado polvo o como máximo objetos de algunas decenas de metros de diámetro. Pero el aspecto irregular en forma de ocho de las lunas más pequeñas de Saturno indicó que también ellas eran fragmentos de objetos mayores. Además, se descubrieron extraños radios que afectaban a los anillos y que no habían sido tomados en consideración por los estudios realizados en la Tierra. Estos radios podían ser debidos a los efectos gravitacionales de los satélites más próximos. En Saturno, además, se detectaron vientos que soplaban a una velocidad de unos 1.800 km/h, con una temperatura de la atmósfera de unos –178 °C. De todos los satélites de Saturno, el que presentaba una superficie más activa geológicamente resultó ser Encelado, con largos valles y fallas. El Voyager 1 descubrió también que la luna Mimas posee un cráter de impacto tan grande que el asteroide que la golpeó estuvo a punto de fracturarla. El campo magnético de Saturno resultó ser menos intenso que el de Júpiter.

URANO

El Voyager 2 sobrevoló el planeta a una altura de unos 81.500 km. Se sabía que el planeta tiene su eje de rotación inclinado más de 80°; la sonda descubrió que este hecho influye profundamente en la forma del campo magnético del planeta y que también él está inclinado unos 60° respecto a su eje de rotación. Antes de la llegada de las sondas Voyager, no se conocía tampoco la existencia de un campo magnético. Éste es comparable al campo magnético de la Tierra, aunque varía mucho de un punto a otro porque su centro está notablemente desplazado respecto al centro físico del planeta. El Voyager 2 descubrió 10 nuevas lunas, muchas de las cuales resultaron ser muy pequeñas; la mayor medía 150 km de diámetro. Miranda, la más interior de las cinco grandes lunas, apareció a los ojos de la sonda como uno de los más extraños objetos del sistema solar: cañones de 20 km de profundidad, estratos en forma de terrazas, superficies geológicamente jóvenes dentro de otras muy viejas lo convierten en un objeto muy misterioso desde el punto de vista geológico. Se supone que el satélite pudo ser el resultado de la agregación de material que vagaba por el espacio, producto de la destrucción de un objeto precedente por obra del impacto con un asteroide. El estudio de los anillos de Urano demostró la diferencia entre estos últimos y los de Júpiter y Saturno; los de Urano son muy jóvenes.

NEPTUNO

Cuando el Voyager lo sobrevoló a 4.500 km de altura, el planeta resultaba ser el más



En esta reconstrucción artística, la sonda Voyager orbita alrededor de Saturno.

distante de todos los planetas del sistema solar (Plutón volverá a serlo en 1999). Pese a recibir sólo el tres por ciento de la energía solar captada por Júpiter, Neptuno ha revelado a la sonda que es un planeta muy activo, con manchas grandes y oscuras que recuerdan de cerca la Gran Mancha Roja de Júpiter. Una de ellas, la llamada Gran Mancha Oscura, tiene el tamaño de la Tierra. En la atmósfera de Neptuno se observaron unas nubes largas y claras similares a los cirros de la Tierra. Se registraron los vientos más veloces de todo el sistema solar. En su mayor parte, giran hacia el oeste, en dirección opuesta a la del planeta, con una velocidad de 2.000 km/h. El campo magnético de Neptuno resultó estar inclinado 47° respecto al eje de rotación. En Tritón, el mayor de los satélites de Neptuno, se descubrieron géiseres activos que emitían nitrógeno gaseoso y partículas de polvo a bastantes kilómetros de altura sobre su tenue atmósfera. El Voyager 2 permitió también dar una explicación de los arcos de anillos que circundan el planeta.

LA MISIÓN INTERESTELAR

Las dos sondas Voyager siguen enviando a la Tierra datos sobre el espacio interplanetario y sobre las características de algunas estrellas próximas a los confines de la Vía Láctea. En mayo de 1993, además, los científicos lograron detectar emisiones radioeléctricas que se producen en la heliopausa, el límite exterior del sistema solar. De esta región no se sabía siquiera cuál era su posición: ahora se sabe que se extiende entre 90 y 120 unidades astronómicas.



EN EL PRÓXIMO NÚMERO

EL SISTEMA SOLAR

ORIGEN DE LA VIDA EN LA TIERRA

ESTRELLAS Y GALAXIAS

EL GRAN DEBATE SHAPLEY-CURTIS

GUÍA DE LAS CONSTELACIONES

EL ESCULTOR

LA EXPLORACIÓN DEL ESPACIO

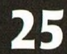
LOS PADRES DE LA ASTRONÁUTICA

EL USO DEL ESPACIO

SATÉLITES PARA EL ESTUDIO DE LA TIERRA

EL UNIVERSO

ENCICLOPEDIA DE LA ASTRONOMÍA Y EL ESPACIO





PLANETA DeAGOSTINI



COMPOSICIÓN DE LA OBRA

Volumen 1	Fascículos 1	al	16
Volumen 2	Fascículos 17	al	32
Volumen 3	Fascículos 33	al	48
Volumen 4	Fascículos 49	al	64
Volumen 5	Fascículos 65	al	80

VENTA EN QUIOSCOS

Pida a su proveedor habitual que le reserve un ejemplar de EL UNIVERSO. Adquiriéndolo todas las semanas en el mismo punto de venta facilitará la distribución y obtendrá un mejor servicio.
Las tapas correspondientes a cada volumen se ponen a la venta con el fascículo que cierra el tomo. Con dicho fascículo se entregan las portadillas correspondientes.

Presidente: José Manuel Lara
Director General: Carlos Fernández
Director Editorial: Virgilio Ortega
Director General de Producción: Félix García
Coordinador General: Carles Dorico

© Editorial Planeta Argentina S.A.I.C.
Av. Independencia, 1668 - Capital Federal
Servicio de atención al cliente: Tel. (01) 482 - 0655 y 482 - 0657
Distribuye: Capital: Huesca-Sanabria,
Baigorri, 103, Capital Federal,
Interior: D.G.P., Alvarado, 2118, Capital Federal

© Editorial Planeta Mexicana, S.A. de C.V.
Av. Insurgentes Sur # 1162 - México D.F.
Servicio de atención al cliente: Tel. 575 13 48

© Editorial Planeta Colombiana, S.A.
Carrera, 68, n.º 25-55 - Santa Fé de Bogotá, D.C.
Servicio de atención al cliente: Tel. 9800 - 15315

© Editorial Planeta Chilena, S.A.I.C.
Olivares, 1229 - Santiago de Chile

ISBN Obra completa (con vídeo): 84-395-4148-1
Obra completa (sin vídeo): 84-395-4138-4
Fascículos (con vídeo): 84-395-4149-X
Fascículos (sin vídeo): 84-395-4139-2
Depósito legal: B-47.097-1997

Impresión: Cayfosa, Santa Perpètua de Mogoda, Barcelona
Impreso en España - Printed in Spain - Mayo 1998

Los editores se reservan el derecho de modificar el precio de venta de los componentes de la colección en el transcurso de la misma, si las circunstancias así lo exigieran.
Los editores garantizan la publicación de todos los fascículos que componen esta obra.

Fotografías: Lee Gibbons: cubierta, 116-117, 116ab., 117ar.; ESA/SPL: 107c.der.; E.T. Archive: 106ar.; Galaxy Picture Library: 101, 104, tercera de cubiertas; IGDA: 107ar.der.; Science Photo Library/Julian Baum: 106-107; Dr. Jeremy Burgess: 103 der.; Range: 111; Hugh Rowland: 110; Spectrum: 110, 111; US Naval Observatory: 112ar.izq.; Bristock-IFA: 114-115; BNSC/ESA: 118ab.; ESA: 118-119, 119ab., 120c.; Tony Stone Picture Library: 120ab.
Dibujos: Robin Carter/WLAA: 104-105, 117ab.; David A. Hardy: 102-103; Hugh Rowland: 105, 106ab., 120; Katz: 108-109; Sandra Russell/Black Hat: 112ar.; Julian Baum: 113; Farroxs: 116ar.; Robin Bottel: 115ab.; Spectrum Picture Library: 114ab.

PETICIÓN DE FASCÍCULOS ATRASADOS

Válido sólo para el territorio español y para no suscriptores.

Si desea recibir algún fascículo atrasado o tapas, rellene en LETRAS MAYÚSCULAS este boletín y envíelo a:
PLANETA-DeAGOSTINI, Apartado de Correos N.º 2.867 - 08080 Barcelona, o llame al Tel. **902 288 288***

DATOS PERSONALES:

APELLIDOS

NOMBRE

CALLE O PLAZA

N.º PISO PUERTA ESC.

CÓDIGO POSTAL POBLACIÓN

PROVINCIA EDAD

TELÉFONO PROFESIÓN

FIRMA (Imprescindible)

• Recibirá contrarreembolso, más gastos de envío todo el material que nos haya solicitado.

SOLICITUD:

EL UNIVERSO
ENCICLOPEDIA DE LA ASTRONOMÍA Y EL ESPACIO

Indique los números de los fascículos atrasados que desea recibir:

N.º de tapas que solicita:

Indique si desea recibir la versión con vídeo o sin vídeo:

Con vídeo ☐ Sin vídeo ☐

• Planeta-DeAgostini mantendrá su servicio de petición de atrasados hasta un plazo máximo de 18 meses a partir de la fecha de venta de cada uno de los números que forman la colección.

EL ORIGEN DE LA VIDA EN LA TIERRA

El origen de la vida es uno de los grandes temas de reflexión del hombre, reflexión religiosa, pero también científica.



Cómo apareció la vida en nuestro planeta? ¿Cuáles fueron las condiciones particulares que determinaron su origen y su desarrollo posterior?

LA APARICIÓN DE LA VIDA EN LA TIERRA

La forma de vida más antigua de la que se tiene testimonio consistía en unas estructuras calcáreas llamadas estromatolitos, depositadas por algas microscópicas unicelulares. Se remontan a unos 3.500 millones de años. Nuestro sistema solar, y con él la Tierra, se formó hace entre cuatro y cinco mil millones de años. Originariamente, la Tierra no era un lugar en el que pudiera proliferar la vida tal como nosotros la conocemos. Por tanto, ¿qué sucedió en tiempos muy remotos? ¿Qué es lo que permitió la aparición de la vida en la Tierra? En realidad, todavía no existen respuestas exhaustivas a estas preguntas.

LA GENERACIÓN ESPONTÁNEA

Fundamentalmente, la ciencia busca una respuesta a la pregunta siguiente: ¿cómo

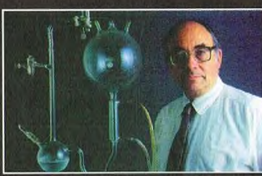
El medio en el cual se formaron los primeros compuestos orgánicos era un océano primordial. Las descargas de los rayos y la intensa radiación ultravioleta proporcionaban la energía necesaria para las reacciones químicas.

pudo ocurrir el paso de materia no viva a materia viva? Puede hablarse de una especie de generación espontánea, ocurrida en condiciones especialísimas en la superficie terrestre. Hoy, en la Tierra, no es posible un proceso similar. Sabemos que cada animal genera un semejante suyo, y que la materia inanimada no puede dar origen a un organismo vivo. En el pasado, estaba muy extendida la creencia de que algunos organismos, como gusanos o insectos, podían nacer de sustancias inanimadas, como el barro o el agua putrefacta. Esta opinión duró hasta tiempos bastante recientes. Sólo en el siglo XVII empezó a ser puesta en duda por el naturalista Francesco Redi (1626-1698), que demostró que los organismos pluricelulares, como por ejemplo los gusanos, no podían en modo alguno generarse espontáneamente a partir de la carne, sino que nacían de larvas depositadas anteriormente en ella por otros insectos. La cuestión de la existencia de la generación espontánea fue discutida cuando se consideró el nacimiento de microorganismos, discusión que tuvo como protagonistas a Lazzaro Spallanzani (1729-1799) y J.T. Needham (1713-1781). Este último había efectuado una serie de experimentos en los que observó la proliferación de microorganismos a partir de infusiones, es decir, soluciones ricas en sustancias nutritivas, previa esterilización por ebullición. Contra esta idea de generación espontánea, Spallanzani demostró con muchos experimentos que los microorganismos que Needham hallaba sólo eran consecuencia de la contaminación de las infusiones que, en realidad, no estaban herméticamente cerradas. En la segunda mitad del siglo XIX, la polémica entre los que sostenían la posibilidad de la generación espontánea y los que estaban contra ella volvió a abrirse, hasta que Louis Pasteur (1822-1895) presentó sus experimentos, que acabaron definitivamente con la disputa, al demostrar la imposibilidad del proceso de la generación espontánea. Esto significa que, en las condiciones en que se halla la Tierra actualmente, no es posible que un ser vivo nazca de materia no viva. Por consiguiente, ahora, todos los seres vivos se originan a partir de otros seres vivos. Esta teoría recibe el nombre de teoría de la biogénesis. Sin embargo, esto no quiere decir que en la Tierra originaria no hubiera ocurrido este proceso, causante de la aparición de la vida en nuestro planeta. Después de Darwin y la teoría de la selección natural, según la cual las especies no son inmutables, sino que evolucionan en el tiempo adaptándose al ambiente, empezó a abrirse paso la idea de que, en una época lejanísima, quizá existió un antepasado común a todas las especies. Esto vendría justificado, entre otras cosas, por el hecho de que, observando los fósiles, se deduce que en el pasado no existió una gama de formas de vida tan amplia como la de hoy. Pero, ¿cómo y cuándo apareció en la Tierra este progenitor común?





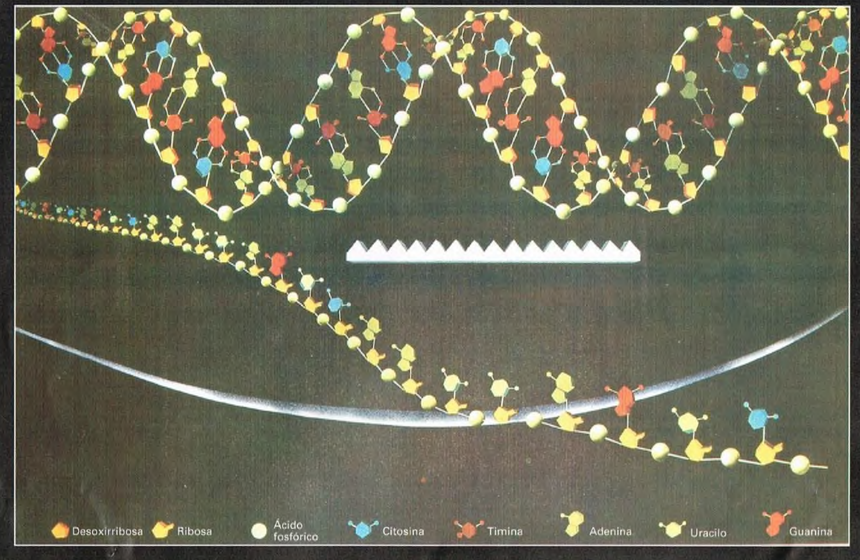
Del estudio de los fósiles, testigos de antiguas formas de vida, es posible obtener informaciones fundamentales sobre la evolución de la vida en la Tierra. A la izquierda, un fósil de Askeptosaurus italicus; *abajo,* Crioceratites emmerici.



Arriba, en 1953, cuando todavía estaba haciendo el doctorado en la Universidad de Chicago, Miller reprodujo con éxito las condiciones de la atmósfera primordial y demostró que era posible la formación de los compuestos orgánicos que son indispensables para la formación y el desarrollo de la vida.

LA ATMÓSFERA PRIMORDIAL

Veamos cuáles eran las condiciones en que se hallaba la superficie terrestre en la época de la aparición de la vida. En la Tierra, lo mismo que en otros planetas como Mercurio y Venus, debía haber una atmósfera compuesta esencialmente de hidrógeno, que no se mantuvo por mucho tiempo alrededor de la Tierra a causa de las elevadas temperaturas. En un segundo tiempo, nuestro planeta empezó a verse rodeado por una atmósfera primordial constituida por gases surgidos de los volcanes que había en su superficie. Los científicos creen que los gases que empezaron a formar la atmósfera de este modo fueron principalmente hidrógeno, vapor de agua, dióxido de carbono, metano, amoníaco e hidrógeno sulfurado.



Arriba, el ADN y el ARN son ácidos nucleicos responsables de la transmisión de los caracteres hereditarios de la especie. Rigen la síntesis de las proteínas en las células.

Seguidamente, la temperatura de la Tierra y la concentración del vapor de agua permitieron su condensación y la formación del agua de los océanos. El dióxido de carbono provocó el calentamiento de la superficie terrestre. En realidad, este gas es transparente a la luz visible procedente del Sol, una radiación que puede atravesar la atmósfera y llegar hasta la superficie de la Tierra. En cambio, el dióxido de carbono no permite que la luz infrarroja que vuelve a irradiar del suelo se disperse por el exterior de la atmósfera. Además, hay que tener en cuenta que, hace unos 1.800 millones de años, la atmósfera terrestre cambió a causa de la producción de oxígeno por las plantas verdes mediante los procesos de fotosíntesis. Así pues, antes de esta época, las condiciones ambientales de la Tierra eran distintas de las de hoy, principalmente en lo que se refiere a la composición de la atmósfera, que carecía de oxígeno. Se cree que en una atmósfera así, los rayos que se producían durante los frecuentes temporales podían proporcionar la fuente de energía necesaria para la formación de moléculas orgánicas que, poco a poco, fueron sumergiéndose en el océano primordial y enriqueciendo sus aguas. En este ambiente acuático prebiótico, llamado caldo primordial, se habrían formado las primeras células. En los años treinta, A. Oparin y J.B.S. Haldane comprendieron que la atmósfera primordial no podía ser rica en oxígeno, ya que, de haberlo sido, los

LOS COMPONENTES DE LA VIDA

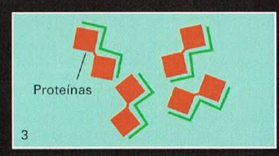
Los elementos químicos que constituyen los organismos vivos y la base de la vida misma son pocos en comparación con la variedad de elementos conocidos. Los más importantes son el carbono, el hidrógeno, el nitrógeno, el oxígeno, el fósforo y el azufre. Puede afirmarse que la vida se basa en el carbono. Esto es así porque el carbono es un elemento muy versátil, ya que puede unirse con facilidad a otros elementos y formar una gran variedad de compuestos orgánicos. Los elementos más fundamentales de la vida se unen entre sí para dar origen a los aminoácidos, las bases nitrogenadas y los azúcares. Los aminoácidos tienen una importancia crucial, ya que son los «ladrillos» con los que se forman las proteínas, unos componentes indispensables para la vida porque participan en la formación de todas las estructuras celulares y también de los enzimas. En cambio, las bases nitrogenadas son los componentes de los ácidos nucleicos, descubiertos por Miescher en 1869. El nombre de éstos deriva del hecho de haber sido descubiertos en el núcleo de las células. Se dividen en ARN (ácido ribonucleico) y ADN (ácido desoxirribonucleico). Mientras que el ARN está formado por una molécula filamentosa simple, el ADN se presenta bajo el típico aspecto de una doble hélice, constituida por la unión de dos moléculas filamentosas. Son unas moléculas enormes compuestas por unidades fundamentales llamadas nucleótidos, cada una de ellas formada, a su vez, por tres componentes: un azúcar (la desoxirribosa en el ADN y la ribosa en el ARN), un grupo fosfórico y una base nitrogenada. Las bases nitrogenadas que forman el ADN son la adenina, la guanina, la timina y la citosina. En el ARN, la timina está sustituida por el uracilo. Los ácidos nucleicos son los responsables del almacenamiento y transmisión de los caracteres hereditarios de padres a hijos.

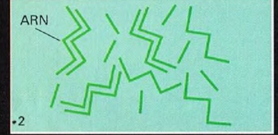
Según algunas teorías, la vida no nació en nuestro planeta, la Tierra, sino que llegó desde el espacio.

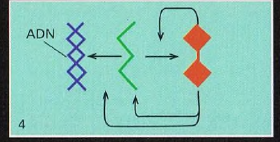
compuestos orgánicos base de la vida no se habrían podido formar, puesto que ese gas les habría arrebatado su hidrógeno e impedido transformarse en moléculas orgánicas más complejas. Estos dos científicos fueron los primeros en apuntar la hipótesis de que la atmósfera primordial debía estar, en gran parte, compuesta por hidrógeno, además de metano y amoníaco.

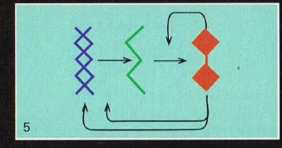
EL CALDO PRIMORDIAL

El primero que intentó reproducir en el laboratorio estas condiciones originarias fue el americano L.S. Miller, en 1953, por aquel entonces estudiante de doctorado en el laboratorio de H.C. Urey, de la Universidad de Chicago. Miller, con un famoso experimento, demostró que la situación en que debía hallarse la Tierra hace miles de millones de años hacía posible el desarrollo de sustancias orgánicas, como los aminoácidos, a partir de una mezcla de gases (metano, amoníaco, hidrógeno y vapor de agua) sometida a descargas eléctricas. La mezcla reproducía la atmósfera primitiva, mientras que las chispas querían semejar los rayos. Entre estos gases no estaba el oxígeno, tal como

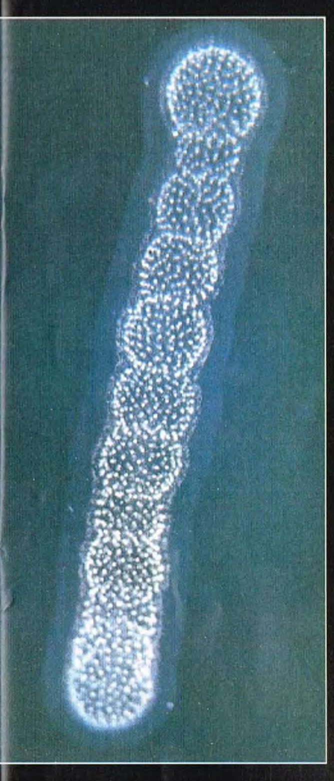








En la secuencia de estos cinco dibujos, se representa la producción de proteínas mediante el ARN. El ARN se forma a partir de la ribosa y de otros compuestos orgánicos (1), se duplica (2) y empieza a sintetizar las proteínas (3). Luego, éstas ayudan al ARN a sintetizar proteínas más eficaces y a transformarse en ADN (4). La cadena se cierra con la transferencia del patrimonio genético del ADN al ARN (5).

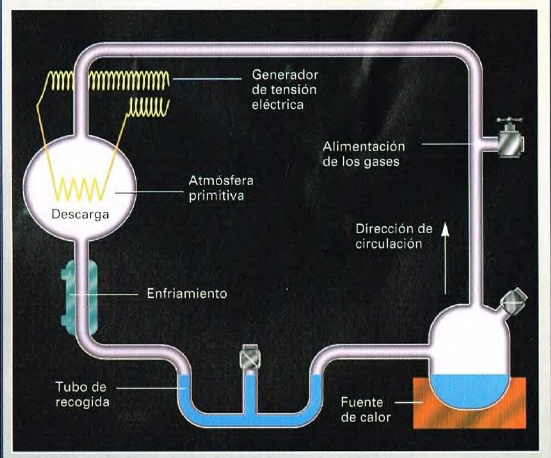


Aunque es posible explicar la formación de los aminoácidos en una atmósfera primordial, todavía no se ha logrado comprender cómo ocurrieron el nacimiento y el desarrollo de la célula.

debía ocurrir realmente en la Tierra después de la formación del planeta. Las sustancias orgánicas así originadas debieron depositarse luego en el océano primitivo. Se cree que su concentración en las cuencas acuáticas debió ser bastante importante, ya que estas sustancias no eran transformadas ni por bacterias, que no existían, ni por el oxígeno, que tampoco estaba presente en la atmósfera. Miller, analizando el contenido de su caldo prebiótico, vio que, en efecto, parte del carbono existente originariamente había formado compuestos orgánicos y aminoácidos, entre los cuales el más abundante resultó ser la glicina. Algunos estudios posteriores parecían indicar que en el caldo primordial se habían formado también los componentes de los ácidos nucleicos. De este modo parecía demostrarse que la síntesis de compuestos orgánicos puede producirse con bastante facilidad en un ambiente formado principalmente por hidrógeno. Estas sustancias se acumularon en el mar primitivo a lo largo de millones de años. En parte, eran solubles en el agua y en parte insolubles, pero se mezclaron por las tempestades y formaron burbujas de espuma. Probablemente, estas burbujas, pequeñísimas, que contenían agua y compuestos orgánicos, fueron el origen de las primeras membranas celulares. En realidad, estas microesferas estaban muy lejos de tener una auténtica organización celular, aunque algunos científicos suponen que estos primeros agregados, formados por conjuntos de moléculas, sobre todo proteínas, empezaron a organizar funciones, como la respiración, es decir, la obtención de energía en una atmósfera, como la primitiva, carente de oxígeno. Seguidamente –todavía no se sabe de qué modo– parece que los ácidos nucleicos empezaron a controlar las diversas actividades de estos organismos primordiales. No conocemos todavía los verdaderos mecanismos que permitieron la formación de un código genético a partir de interacciones de moléculas simples. Todo lo dicho tiene más de hipótesis que de conocimiento científico consolidado. Sin embargo, está demostrado que algunos compuestos orgánicos necesarios para la vida pueden ser sintetizados en una atmósfera de tipo primordial sometida a una forma de energía, ya sea procedente de rayos y descargas eléctricas, o bien de la considerable radiación ultravioleta que nos llega del Sol. En realidad, esta radiación no tropezaba originalmente con la pantalla de la atmósfera terrestre, porque el ozono que hoy nos protege de ella, formado por tres átomos de oxígeno, todavía no podía existir en la atmósfera.

EL EXPERIMENTO DE MILLER

Al final de su experimento, Miller halló en su océano primordial una gran cantidad de compuestos del carbono, incluidos algunos aminoácidos, que no estaban allí al principio. En el sistema se produjeron reacciones entre los gases de la mezcla, reacciones que dieron compuestos simples, como el ácido cianhídrico (HCN) y algunos aldehídos. Éstos se combinaron con el amoníaco y el ácido cianhídrico dando lugar a otros compuestos que, a su vez, al interactuar con el agua, formaron los aminoácidos.



En este dibujo se representan las secuencias del experimento de Miller.

EL GRAN DEBATE SHAPLEY-CURTIS

Dos astrónomos, uno joven, con unas perspectivas óptimas, y otro de más edad y prestigioso profesor, libraron una batalla ante un público compuesto por especialistas –y no especialistas– a 150 dólares por cabeza (más los gastos). No fue una verdadera batalla, pero las ideas que discutían estaban desvelando un universo bastante más vasto de lo que nunca se había supuesto.



Después de más de 75 años del acontecimiento, todavía hoy es útil recordar el 26 de abril de 1920. E. Shu, en un libro de 1982, evoca de esta manera los hechos: «Es importante, no sólo como documento histórico, sino también para comprender el modo de razonar de científicos eminentes que se enfrentaron contando con unas bases que, por ambas partes, eran fragmentarias y parcialmente erróneas. Este debate muestra claramente lo difícil y equívoco que puede resultar un camino cuando se va por un terreno peligroso, característico de la investigación científica en las fronteras de lo desconocido».

LOS DOS CONTENDIENTES

¿Qué teorías se ponían frente a frente? ¿Quiénes eran las dos personas que las representaban? ¿Hubo un vencedor en el «Gran Debate»? Los contendientes se llamaban Harlow Shapley, que entonces tenía 35 años, y Heber Doust Curtis, de 58 años. El primero defendía la idea de una Vía Láctea de dimensiones gigantescas en base a sus propias mediciones de las distancias de muchos cúmulos globulares. El segundo pertenecía al amplio colectivo de astrónomos de la época que atribuía a nuestra Galaxia, la Vía Láctea, unas dimensiones reducidas y veía en las nebulosas espirales otras tantas galaxias compuestas igualmente por estrellas. Los dos diferentes puntos de vista estaban apoyados por pruebas obtenidas en observaciones, datos de otros astrónomos y teorías que luego han resultado erróneas. Razón y error se repartían por igual en las tesis de ambos científicos y, si bien Curtis quizá se acercó más a la realidad, Shapley demostró que su mente se dirigía hacia una ciencia más moderna. Examinando los hechos desde la perspectiva que da el tiempo, hoy podemos afirmar que, en aquella época, tuvo lugar un auténtico viraje en el conocimiento científico de la posición del hombre en el universo. Tanto Curtis como Shapley estaban en sintonía con los avances que la astronomía había dado hasta entonces en cuanto al alejamiento de la Tierra del centro del universo.

Shapley sostenía la idea de que nuestra Galaxia tiene una forma de disco aplanado, con un diámetro de unos 300.000 años luz y que el sistema solar no se encuentra en el centro de este disco, sino, al menos, a 60.000 años luz de distancia. Este desplazamiento del centro del cosmos era comparable a la revolución copernicana. Shapley elaboró esta hipótesis en solitario. Curtis, en cambio, no estaba solo, sino que era más bien el máximo exponente de un grupo de astrónomos que sostenían que la Vía Láctea no estaba en el centro del universo, sino que era







A la derecha, fotografías de Heber Doust Curtis (arriba) y Harlow Shapley (abajo).

A la izquierda, imagen de una parte de la galaxia de Andrómeda que lleva la anotación del Hubble, «VAR». Con ella se indicaba la localización de algunas cefeidas.

A la derecha, este mapa, dibujado por Tempel, es un esbozo que data de 1875 e indica las posiciones de M31, M32, M110 y NGC 206.

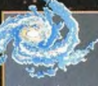


únicamente una galaxia igual al resto de las nebulosas espirales que se ven en el firmamento. Así pues, el universo pasaba a ser muchísimo más grande de lo que se había considerado hasta entonces. Ambos puntos de vista demostrarían ser correctos en los años siguientes, a pesar de que, en 1920, la teoría de la relatividad formulada por Einstein y los modelos de universos en expansión ya eran conocidos.

LA DISCUSIÓN CIENTÍFICA

La confrontación de las dos teorías puede, y debe, situarse en el ámbito de los datos científicos que hoy podemos sintetizar en una serie de observaciones:

1) Las estrellas de tipo espectral F, G y K que se habían observado en los cúmulos globulares eran consideradas por Shapley del mismo modo que las estrellas gigantes presentes en nuestra Galaxia. La comparación de las dos distintas luminosidades aparentes hacía presuponer que la distancia a los cúmulos era enorme. Curtis, por el contrario, las asimilaba a las pequeñas estrellas que abundan en los alrededores del Sol. Al ser éstas intrínsecamente más débiles, la diferencia de luminosidades observada era menor, y la distancia derivada de los cúmulos globulares se hacía 10 veces más pequeña. Sólo con los telescopios más potentes utilizados en los años cincuenta pudieron observarse ambos tipos (estrellas gigantes y enanas) en los cúmulos y se pudo dar la razón a Shapley.



2) Las estrellas gigantes azules (de tipo espectral B) que Shapley había observado en los cúmulos globulares de nuestra Galaxia eran de tipo distinto a las estrellas análogas más cercanas a nosotros, argumentaba Curtis, a diferencia de su interlocutor, que las consideraba análogas. La cuestión se resolvió gracias a las observaciones de Walter Baade durante la segunda guerra mundial, que demostraron la existencia de dos poblaciones distintas de estrellas.

3) Para medir las distancias, Shapley utilizaba la relación período-luminosidad (P-L) de las estrellas variables cefeidas. Esta relación se basaba en el comportamiento de las estrellas en las Nubes de Magallanes, pero se calibraba empleando poquísimas estrellas próximas cuya distancia se conocía mediante otros métodos. Shapley confiaba en su teoría, mientras que Curtis oponía su eslogan preferido según el cual se necesitaban más datos. La relación P-L es todavía hoy una base sólida para medir distancias. En este sentido, Shapley fue un precursor, pero la calibración que utilizaba era errónea.

4) El recuento de estrellas de la bóveda celeste era un punto fuerte a favor de una galaxia muy pequeña, y Curtis lo demostró claramente. Lo que omitía se conoce hoy como absorción interestelar, o presencia de capas de polvo dentro de nuestra Galaxia, que nos impiden ver muy lejos y, especialmente, la parte central de la Galaxia.

5) Al contar las nebulosas espirales se demostraba que eran muy pocas las nebulosas visibles en la dirección del plano de nuestra Galaxia, mientras que eran muy numerosas por encima y por debajo. Para Shapley esto no era un gran problema, ya que la unicidad de nuestra Galaxia implicaba características únicas para cualquier otro objeto. Curtis, en cambio, propugnaba un universo lleno de galaxias similares, y justificó la falta de galaxias externas a lo largo del plano de la Vía Láctea admitiendo que un anillo de polvo podía circundar el exterior de nuestra Galaxia. Curtis tenía razón al atribuir la causa a la absorción, pero no admitió la presencia de polvo dentro de la Vía Láctea.

6) La luminosidad de las estrellas novas observadas en las espirales se comparó con la de las novas de nuestra Galaxia. Curtis hizo observar que ambas luminosidades estarían perfectamente de acuerdo si se hubiese tomado como estándar la magnitud de cuatro novas galácticas de distancia

En la imagen grande, la galaxia de Andrómeda M31 y las pequeñas galaxias elípticas M32 (NGC 221) y NGC 205, que forman parte del Grupo Local.

EL CENTRO DEL UNIVERSO

Los primeros que establecieron una medida astronómica fueron los griegos. Eratóstenes anunció que la Tierra debía ser esférica porque se observaba que la sombra, a mediodía, tenía diferentes longitudes según las ciudades. La estimación de la posición del centro de la Tierra fue de 9.000 km bajo los pies de Eratóstenes. El centro del universo fue el centro de la Tierra hasta 1543, cuando Copérnico osó colocar el Sol en la posición central. Galileo comprendió que muchas de las zonas nebulosas de la Vía Láctea no eran más que estrellas. Con ello, sentó las bases para la equiparación del Sol con una estrella. Hasta la época del «Gran Debate» la posición del Sol permaneció en el centro de la Vía Láctea o, al menos, muy cerca de él. La Vía Láctea se consideraba una franja de estrellas, pero de forma desconocida. En los años veinte, primero Shapley y luego Hubble demostraron que el sistema solar ocupaba una región alejada del centro galáctico, y que la Vía Láctea era una galaxia más entre millones.



Arriba, la región central de M31, en una fotografía tomada con el telescopio de 1,1 m del observatorio Lowell. La zona que se ve tiene un lado de 9 minutos de arco.

conocida y si las espirales estuvieran a distancias notables de nosotros. Shapley adujo que, al menos en un caso, la luminosidad de una nova galáctica era tan elevada que, llevada a nebulosas lejanas, habría cuestionado las medidas de dimensiones y distancias. Una vez más, la posición de Curtis fue la de admitir la posibilidad de dos clases de novas. En 1933, Baade y Zwicky demostraron claramente la existencia de las estrellas llamadas supernovas.

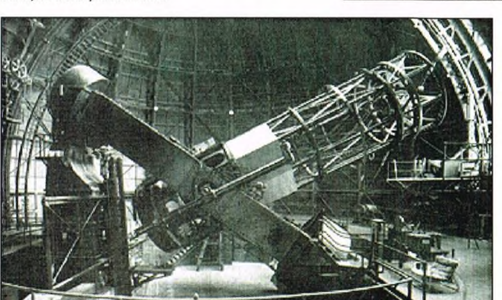
7) El hecho de que la mayoría de las nebulosas espirales muestren, a través del análisis de sus espectros, grandes velocidades de alejamiento, fue explicado por Shapley como efecto de una repulsión de nuestra Galaxia debida a la presión de la radiación emitida por las estrellas. En la física de 1920, esta teoría no tenía, ni tiene hoy, ningún fundamento físico y, con mucha intuición (o suerte), Curtis propuso que todas las galaxias (comprendida la nuestra) tenían intrínsecamente velocidades elevadas.

8) Curtis hizo notar que el espectro de las nebulosas era análogo al de los cúmulos estelares y que esto probaba que también las nebulosas espirales estaban formadas por estrellas.

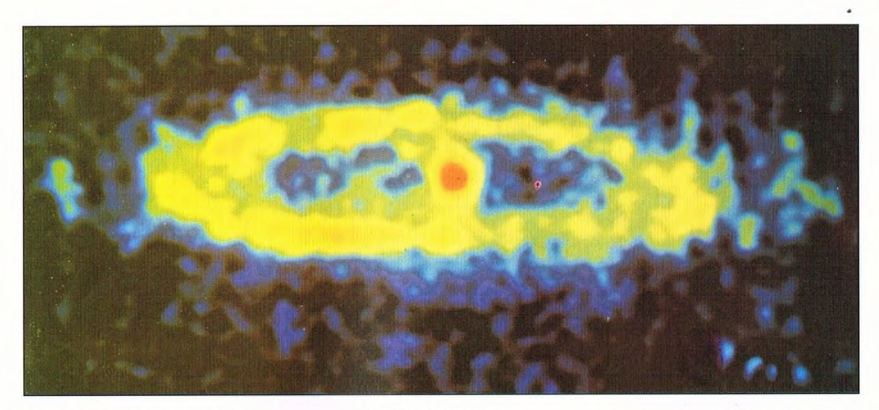
9) Van Maanen había medido el movimiento propio de las nebulosas espirales y Shapley lo usó en su favor, ya que un movimiento propio, aunque fuera pequeño,



Arriba, región central de la galaxia de Andrómeda (M31) fotografiada con el telescopio de 2,54 m de apertura del observatorio Monte Wilson.



Abajo, el telescopio de 2,54 m de apertura del observatorio Monte Wilson. Instalado en 1917, fue durante 32 años el mayor telescopio del mundo.



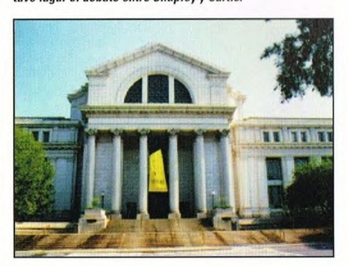
habría significado velocidades próximas a la de la luz si las nebulosas espirales fuesen galaxias lejanas.

Por su parte, Curtis replicó que no podía creer en medidas tan precisas como las que van Maanen publicaba. Y Curtis tenía razón: las nebulosas espirales no muestran ningún movimiento propio, como Lundmark pudo constatar pocos años después volviendo a examinar las mismas placas fotográficas.

LAS CONCLUSIONES

También desde el punto de vista científico, en las teorías de los dos contendientes de 1920 había parte de razón y parte de error. Cada uno de ellos se acercaba a la verdad (tal como hoy la conocemos) en los argumentos que mejor presentaron: las dimensiones de la Vía Láctea y la posición dentro de ella (Shapley), y el carácter extragaláctico de las nebulosas espirales (Curtis). Ambos estaban seguros de lo que exponían cuando se trataba de utilizar los datos recogidos personalmente: uno, las distancias a los cúmulos globulares; otro, las imágenes de las nebulosas espirales. Pero ambos se perdieron cuando confrontaron sus datos con los de otros observadores.

Abajo, entrada del Museo Nacional de Washington, donde tuvo lugar el debate entre Shapley y Curtis.



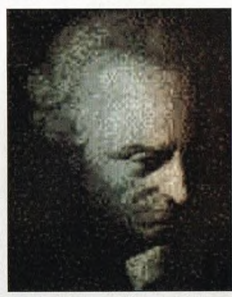
EL ENCUENTRO

Los participantes en el debate, los espectadores del Auditorio Baird del Museo de Historia Natural (hoy Museo Nacional) de Washington, habrían votado mayoritariamente a Curtis, aunque sólo fuese por la presentación que hizo. Mientras que Shapley leyó

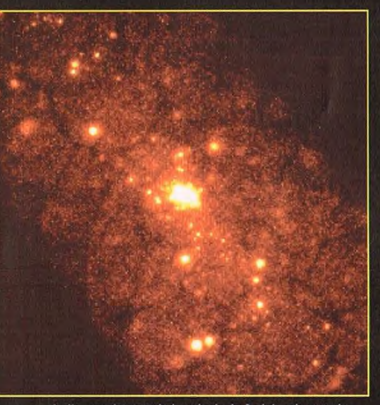
Arriba, mapa de radioondas de la galaxia M31.

LAS DIMENSIONES DEL UNIVERSO

Después de haberse establecido que la Tierra era una esfera, el universo pasó a tener las dimensiones de todo el sistema solar. Kepler pudo calcular la distancia al planeta más externo –en aquel tiempo, Saturno– y ampliar las dimensiones del universo. La distancia a la entonces llamada esfera de las estrellas fijas era absolutamente insondable. En 1700, los astrónomos empezaron a especular sobre la forma de la distribución de las estrellas en el universo, e Immanuel Kant propuso un modelo para la Vía Láctea similar al del sistema solar. Pero las dimensiones de esta gran «lente de estrellas» (una idea que se aproxima mucho a la realidad tal como hoy la conocemos) siguieron sin ser cifradas. A finales del siglo XIX, el astrónomo holandés Kapteyn, mediante un recuento de estrellas, fijó las dimensiones de nuestra Galaxia (y, por tanto, las del universo conocido) en 30.000 años luz de diámetro. El sistema de estrellas era lenticular, con un espesor de sólo 6.000 años luz. Según Kapteyn, el Sol ocupaba un lugar próximo al centro de la Galaxia. Para Curtis, las dimensiones eran todavía éstas. Pero según Shapley, en base a las distancias a los cúmulos globulares, la distancia al centro de la Vía Láctea era de 60.000 años luz y su diámetro de unos 200.000 años luz. En 1932, Jan Oort, descubridor de la rotación galáctica, fijó la distancia al centro de la Galaxia en 30.000 años luz. Diversas medidas llevaron a la Unión Astronómica Universal a fijar, en 1985, la distancia del Sol al centro de la Vía Láctea en 27.700 años luz.



Retrato de Immanuel Kant.



Arriba, una imagen de la galaxia de Andrómeda tomada con rayos infrarrojos.

sus 19 folios dactilografiados, llenos de correcciones a mano, Curtis proyectó diapositivas que esquematizaban su línea de razonamiento en carácteres tipográficos. El propio Curtis escribió a su familia que «el debate de Washington fue bien» y que muchos lo consideraban el vencedor del encuentro.

El debate tuvo escasa resonancia en los medios de comunicación: ningún periódico mencionó el acontecimiento, mientras que los dos nombres aparecieron varias veces en los ensayos sobre la escala de las distancias astronómicas. El propio Shapley no lo cita en su famoso libro *Galaxias*, publicado muchos años después, cuando se había convertido en uno de los astrónomos más famosos y conocidos.

LA SOLUCIÓN

La cuestión de las dimensiones de la Vía Láctea ha sido objeto de muchas revisiones después de aquel año. De todos modos, la Galaxia de Shapley era demasiado grande y la de Curtis demasiado pequeña. Más grave fue el error de Curtis al suponer que el Sol con su sistema planetario estaba cerca del centro de la Vía Láctea. Hoy, por lo general es aceptado el hecho de que nosotros ocupamos una posición casi periférica en la Galaxia, y que la distribución de estrellas en el firmamento es sesgada por nuestra proximidad al cinturón de Gould, un conjunto de estrellas que forman el brazo espiral y cuya existencia había sospechado Shapley.

GALAXIAS EXTERNAS

Muy pronto, la naturaleza de las nebulosas espirales quedó claramente definida. En 1924, Edwin Hubble observó estrellas variables cefeidas en la nebulosa de Andrómeda (M31) y en otras nebulosas próximas. Este hecho fue publicado por fin en el *New York Times* el 23 de noviembre de 1924, pero sin darle ningún relieve especial. La notificación oficial tuvo lugar en la convención de la AAAS, entre 1924 y 1925, y las mediciones de Hubble establecieron que M31 está más allá de cualquier dimensión posible de la Vía Láctea, más allá incluso de aquella tan gigantesca supuesta por Shapley. Curtis aceptó tranquilamente que la teoría de la relación período-luminosidad (P-L) de las cefeidas fuese exacta, mientras que Shapley vio desvanecerse su universo. En aquella ocasión, admitió haber confiado en los datos de van Maanen porque era amigo suyo.

MÁS ALLÁ DE LA VÍA LÁCTEA

El descubrimiento de que la galaxia de Andrómeda era un sistema exterior a nuestra Galaxia amplió el horizonte de la astronomía. Se comprendió que todas las nebulosas que entonces se definían como universos-isla, visibles en los telescopios terrestres, eran galaxias similares a la Vía Láctea.

CASIOPEA
LAGARTO
ANDRÓMEDA
NGC 205
M31
M32
PEGASO

Arriba, gran mapa del cielo que representa la constelación de Andrómeda y las constelaciones limítrofes.

Arriba, parte interior de la galaxia de Andrómeda, o M31, tomada en el rojo.

LA VERDADERA DISTANCIA A M31

La clave de todo fueron las cefeidas. Estas estrellas son muy luminosas y varían periódicamente de luminosidad, con períodos que van desde unos 2 hasta unos 40 días. La característica de mayor interés para la medida de las distancias es la relación período-luminosidad (P-L) según la cual las variables de período más largo son también las más luminosas. La calibración de la relación, que servía para determinar distancias absolutas y no sólo relativas, fue llevada a buen fin por Russell, Hertzsprung y Shapley. Para ello utilizaron algunas estrellas de nuestra Galaxia cuya distancia se había determinado con métodos estadísticos. De este modo, en 1923, Hubble midió la distancia a Andrómeda como equivalente a 280.000 parsec (1 parsec = 3,26 años luz). La galaxia M31 adquiría así la característica de universo-isla, distinta de nuestra Vía Láctea.

La absorción interestelar que atenúa la luz de las estrellas observadas fue descubierta posteriormente y se tomó en consideración. Fue así como Andrómeda se situó a 230.000 parsec. Hasta 1952 no se sospechó que alguna cosa no funcionaba. Fotografías de M31 tomadas con telescopios más potentes no revelaban una clase de estrellas, las RR *Lyrae*, que a la distancia de Andrómeda debieran haberse visto. Walter Baade interpretó correctamente los resultados introduciendo el concepto de población estelar.

Las cefeidas de la primera población difieren 1,5 magnitudes de las de la segunda, y mientras que las primeras abundan en los cúmulos globulares, las segundas pueblan los discos y los brazos espirales de las galaxias. El factor de distancia que corresponde a 1,5 magnitud se acerca a 2 y, por tanto, la distancia a la galaxia de Andrómeda quedaba doblada, a la vez que también se doblaban las dimensiones de todo el universo conocido.

EL ESCULTOR

La constelación del Escultor contiene un pequeño cúmulo de galaxias situadas a unos 10 millones de años luz de la Vía Láctea.



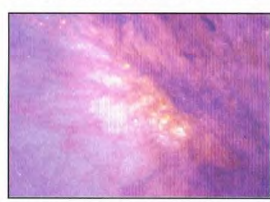
Como la constelación del Pintor, la del Escultor fue introducida por el abate Lacaille en el siglo XVIII. Todas sus estrellas son de magnitud superior a 4, por lo que es bastante difícil distinguirlas. Además, si se observa desde latitudes como la de España, la constelación siempre está bastante baja en el horizonte.

CÓMO LOCALIZAR LA CONSTELACIÓN

Partiendo del cuadrado formado por las estrellas de Pegaso y descendiendo unos 40° hacia el sur, se llega al Escultor. A la derecha de esta constelación, es decir, en dirección oeste si se mira hacia el sur, veremos la brillante Fomalhaut, la Boca del Pez austral.

ESTRELLAS NOTABLES

El astro principal de la constelación es Alfa, una estrella que brilla con magnitud 4,3. Su temperatura superficial es más alta que la del Sol, tanto, que su luz se nos aparece de color azul, aunque su distancia, aproximadamente de 400 años luz, reduce bastante su luminosidad aparente. Épsilon (magnitud 5,3) es una estrella doble que dista de nosotros un centenar de años luz. Sus componentes tienen magnitudes de 5,4 y 8,6; para separarlas, basta un instrumento pequeño. También Kappa 1 es una doble (magnitud 6,1 y 6,2), pero para poder distinguir los dos astros que la componen hay que disponer de telescopios que tengan una apertura de, al menos, 10 centímetros.



Detalle del núcleo de la galaxia NGC 253 tomado con el Hubble. Esta galaxia es el objeto más llamativo del grupo del Escultor, un cúmulo de galaxias entre las más próximas al grupo del que forma parte la Vía Láctea.

OTROS OBJETOS EN EL ESCULTOR

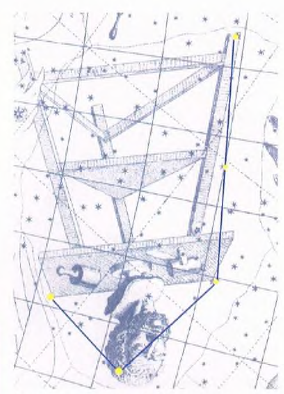
No es casualidad que el Escultor no contenga estrellas muy luminosas: en realidad, contiene el polo Sur galáctico y, por tanto, se encuentra en una de las dos posiciones de la bóveda celeste; la otra es la que está en las proximidades del polo Norte galáctico, donde el número de estrellas perteneciente a la Vía Láctea es menor así como la cantidad de gases y polvos galácticos que atenúan la luz de eventuales objetos extragalácticos. Por consiguiente, esta región del firmamento será un campo inmejorable en el cual pueden buscarse otras galaxias. En efecto, en la constelación se observa un cúmulo de galaxias que dista de nosotros unos 10 millones de años luz.

NGC 253 es una de las galaxias más apartadas de toda la bóveda celeste. También es la más luminosa del cúmulo antes mencionado, llamado grupo del Escultor. Se trata de una galaxia espiral de séptima magnitud, visible de perfil y descubierta en 1783 por la astrónoma Carolina Herschel, hermana del gran astrónomo. La posición en la que se muestra permite ver las zonas más luminosas pobladas de estrellas, en alternancia con regiones más oscuras en las que la luz de sus astros queda oculta por nubes de polvo, lo mismo que sucede en la Vía Láctea con la Hendidura o el Saco de Carbón, en la constelación de la Cruz del Sur.

También NGC 7793 forma parte del grupo del Escultor, pero es menos brillante que la anterior. En realidad, aparece como una débil mancha luminosa de novena magnitud.

NGC 55 es otra componente de este pequeño cúmulo de galaxias, y dista de nosotros 8 millones de años luz. Aunque está bastante próxima a NGC 253 y NGC 7793, es un objeto difícil de distinguir, ya que es de octava magnitud y, por tanto, sólo ligeramente más brillante que la anterior. Probablemente, su forma es irregular.

En las fotografías de larga exposición tomadas con telescopios potentes es posible distinguir una galaxia enana que contiene unos pocos millones de estrellas. Se trata de un objeto muy débil, llamado sistema del Escultor, que forma parte del Grupo Local.



Fue el abate Lacaille quien dio nombre a muchas constelaciones del firmamento austral e introdujo la constelación del Estudio del Escultor, conocida simplemente como el Escultor.



LOS MITOS Y LAS ESTRELLAS

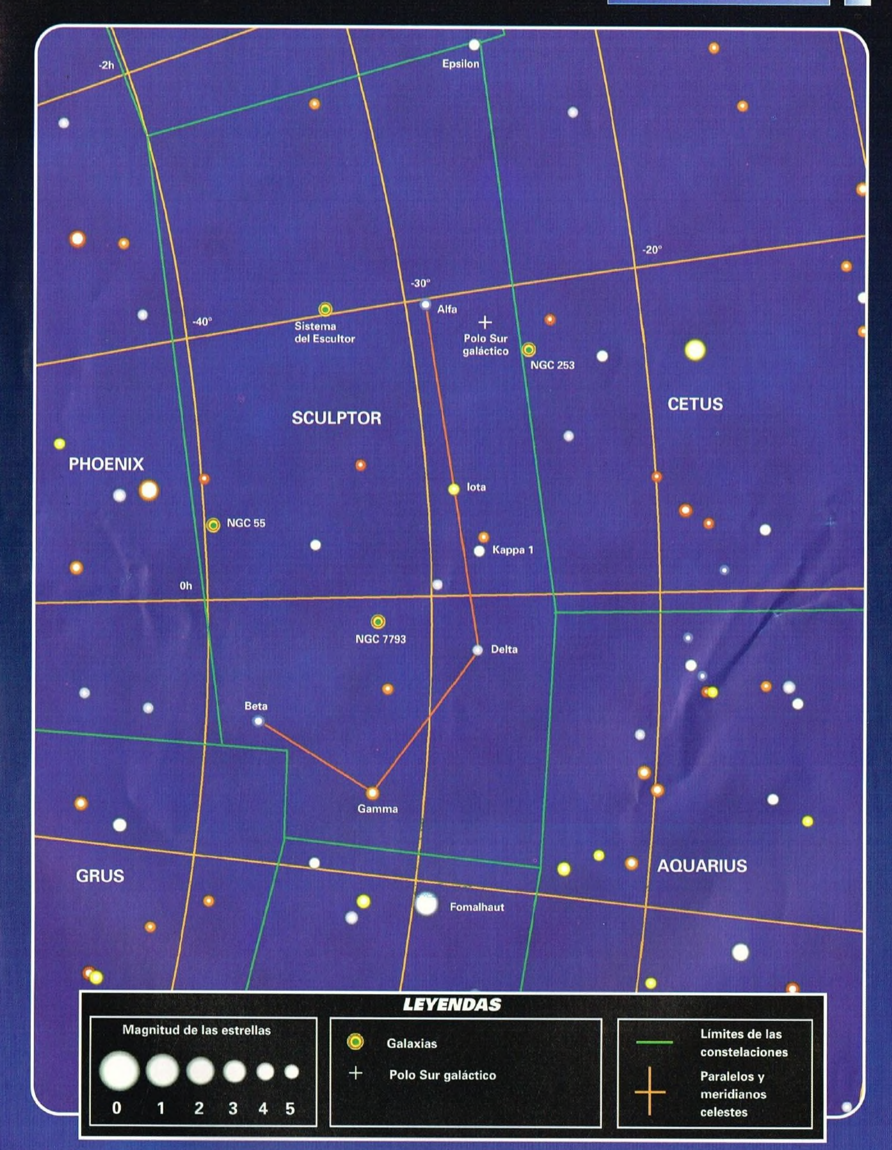
EL ESCULTOR

El nombre original completo de esta constelación, introducida por Lacaille a mediados del siglo XVIII, era *Apparatus Sculptoris* y su autor veía representados en ella un caballete de escultor con un busto de mármol e instrumentos del oficio. Luego, el nombre se contrajo a Escultor y así ha permanecido hasta nuestros días.

DÓNDE BUSCARLA

EL ESCULTOR

La constelación del Escultor abarca una región del cielo comprendida entre 25° S y 40° S de declinación, y entre 23 horas 5 minutos y 1 hora 45 minutos de ascensión recta. Es íntegramente visible todo el año desde latitudes más al sur que 65° S y 50° N. Más al norte de 50° N nunca es enteramente visible.


-2h
Epsilon
-20°
-30°
Alfa
-40°
Sistema
del Escultor
Polo Sur
galáctico
NGC 253
SCULPTOR
CETUS
PHOENIX
Iota
NGC 55
Kappa 1
0h
NGC 7793
Delta
Beta
Gamma
GRUS
AQUARIUS
Fomalhaut
LEYENDAS
Magnitud de las estrellas
0 1 2 3 4 5
Galaxias
Polo Sur galáctico
Límites de las constelaciones
Paralelos y meridianos celestes

LOS PADRES DE LA ASTRONÁUTICA
KONSTANTIN TSIOLKOVSKI Y HERMANN OBERTH

La astronáutica tiene sus padres teóricos en Konstantin Tsiolkovski y Hermann Oberth, quienes entre finales del siglo pasado y comienzos del presente, impusieron al mundo industrializado la idea de que el hombre no permanecerá eternamente ligado a la Tierra, sino que también podrá viajar por el espacio interplanetario.



Konstantin Eduardovich Tsiolkovski tenía 23 años cuando Dmitri Mendeléiev, el gran químico que ordenó la tabla periódica, comprendió que en aquel joven, que por entonces era un simple maestro de escuela elemental, se ocultaba un verdadero científico.

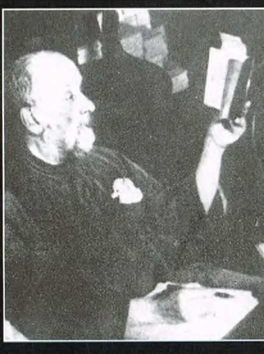
En aquella época, Tsiolkovski enseñaba en Kaluga, a pesar de su sordera causada por una escarlatina infantil. Cuando disponía de tiempo, lo aprovechaba para hacer investigación teórica por su propia cuenta. Había estudiado química, física, astronomía y mecánica en Moscú.

Un día decidió enviar a la Sociedad de Química y Física de San Petersburgo algunos de sus escritos sobre la teoría de los gases y la velocidad de la luz, una síntesis de los estudios que había efectuado durante aquellos años.

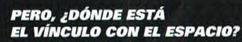
Como en esos escritos no había ningún descubrimiento trascendental, los profesores de la sociedad se indignaron pensando que se trataba de una burla. Pero alguien se dio cuenta de que aquellos textos eran el resultado de un trabajo autónomo y que habían sido elaborados por una persona que ignoraba lo que otros ya habían hecho.

Entonces, Mendeléiev se encargó de escribir a Tsiolkovski para informarle de todo lo que habían constatado los profesores y para decirle que a la Sociedad le interesaba mucho conocer otros eventuales trabajos suyos.

Fue así como se intuyó la genialidad de Tsiolkovski. La sociedad decidió ayudarle con una aportación de 470 rublos, mientras que otros 55 rublos le llegaron gracias a una suscripción abierta entre los lectores de algunos periódicos que habían publicado los resultados de sus investigaciones.



Arriba, una fotografía de Konstantin Tsiolkovski en el escritorio de su casa de Kaluga.



PERO, ¿DÓNDE ESTÁ EL VÍNCULO CON EL ESPACIO?

Pues bien, éste fue el primer hombre que, uniendo ideas de física ya conocidas con nuevos conceptos tecnológicos utilizados todavía hoy, pensó en términos científicos en un vehículo adecuado para volar por el cosmos.

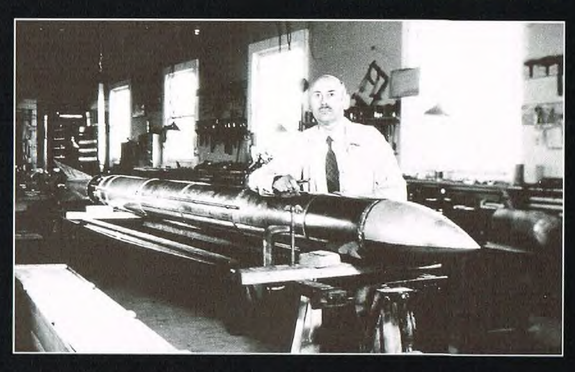
El cohete puede moverse por el vacío porque no tiene necesidad de ningún apoyo físico externo, dado que su movimiento procede del empuje interno. En cambio, el aeroplano se sostiene en vuelo por el efecto aerodinámico del aire bajo las alas.



A la izquierda, la casa de Kaluga donde vivió y trabajó Tsiolkovski es hoy un museo dedicado a su memoria.



Arriba, Robert Goddard fotografiado durante la puesta a punto de un pequeño cohete en la Universidad de Massachusetts.



El estadounidense Robert Goddard participó activamente en la época pionera de los cohetes, desarrollando vehículos cada vez más potentes.

Para una buena comprensión, valga el ejemplo clásico del fusil. Cuando se dispara una bala, que parte hacia delante, se nota en la espalda el efecto del retroceso. Éste es el efecto de reacción descrito por la tercera ley del movimiento de Newton. Lo mismo ocurre con el cohete: al proyectar hacia atrás el chorro de gas producido por la combustión del propulsante, se produce un empuje hacia delante que se ejerce sobre las paredes internas del vehículo. Pero para que tenga lugar la combustión de los propulsantes, se necesita aire o algo que lo sustituya.

Por tanto, pensó Tsiolkovski, el cohete debe llevar consigo el carburante o el comburente. Pero la velocidad de un cohete viene determinada por la velocidad de sus gases de descarga. Cuanto más aumenta la velocidad de descarga, más aumenta también la velocidad del vehículo.

Y aquí se manifiesta la intuición realmente genial de Tsiolkovski: el cohete plurifase. Su modelo no era exactamente igual al que luego se construiría, pero el principio sí. La primera fase, teorizó Tsiolkovski, debe hacer ascender durante algún tiempo todo el complejo del misil a una cierta velocidad. Luego, agotado el carburante, esta fase se desprende. Se enciende la segunda fase. El misil conserva la velocidad que le imprimió la primera fase y añade la velocidad que puede imponerle la segunda.

El gran peso de la primera fase ya no existe, pero su velocidad permanece. De este modo, se pueden construir cohetes que, aunque enormes, resulten de dimensiones razonables. En 1898 Tsiolkovski recogió estas ideas en un largo artículo que mandó a la revista *El observador científico.* El autor tenía 41 años y desde hacía casi 20 trabajaba en el campo científico.

El director de la revista se quedó perplejo con el trabajo recibido y se tomó tiempo antes de publicar el artículo de Tsiolkovski en 1903 con el título: « Exploración de los espacios cósmicos mediante aparatos a reacción».

Después de este artículo, Tsiolkovski dejó pasar algunos años antes de escribir otras cosas. En 1911, inició una colaboración con la revista *Crónicas de aviación* en la que propuso de nuevo sus ideas, pero nadie captó su importancia. Sólo cuando Hermann Oberth empezó a ser tomado en serio en Alemania, Rusia redescubrió a Tsiolkovski. En 1935, Stalin le ofreció un reconocimiento público.

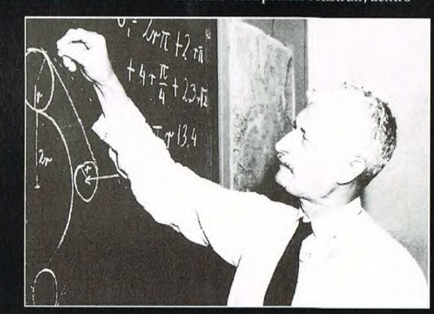
Tsiolkovski murió a los 79 años. En el monumento que lo recuerda en Kaluga está esculpida su frase preferida: «La humanidad no permanecerá eternamente sobre la Tierra».

HERMANN OBERTH

Hermann Oberth se considera hoy el verdadero padre de la astronáutica; pero, como muchos genios, cuando dio a conocer sus primeras investigaciones se le tildó de «padre de las patrañas astrales».

Sólo con 23 años, publicó su revolucionario libro titulado *Los cohetes hacia los espacios interplanetarios,* que fue considerado como un escrito puramente esnob.

En este libro, el joven Oberth exponía sus sorprendentes ideas: «En el estado presente de la ciencia y de la técnica –sostenía– será posible construir, dentro



A la derecha, Hermann Oberth durante una lección, mientras ilustraba para sus alumnos algunos aspectos de sus teorías.



Arriba, Sergei P. Korolev (1906-1966) dirigió el proyecto del lanzador soviético R.7, que puso en órbita el Sputnik 1.

de pocas décadas, máquinas capaces de elevarse hasta más allá de la atmósfera terrestre. Además, estas máquinas podrían alcanzar velocidades tales que les permitirían escapar definitivamente del campo de la atracción terrestre y vagar por el cosmos. Podrían ser pilotadas por el hombre y destinarse al transporte de pasajeros, además de ser razonables desde el punto de vista económico». Pero, ¿quién era Hermann Oberth para llegar a tales conclusiones?

Nacido el 25 de junio de 1894 en Hermannstadt, en Transilvania, después de los estudios secundarios se matriculó en la facultad de medicina de la Universidad de Munich. Inicialmente, deseaba seguir la carrera de medicina, como su padre, pero muy pronto se dio cuenta de que aquél no era su camino. Cuando estalló la primera guerra mundial, el joven Hermann era un estudiante de 20 años. Se enroló en el ejército austríaco y entró a formar parte de un equipo médico. Fue precisamente esta experiencia la que le hizo comprender que la profesión médica no era la más adecuada a sus dotes. Por esto decidió abandonar para siempre la medicina.

Entretanto, se había interesado cada vez más por problemas fisicomatemáticos, especialmente acerca de cómo podría el hombre crear medios capaces de elevarse más allá de la atmósfera. Por esto, al terminar la guerra, se dedicó por completo a las matemáticas, la física y la astronomía, y estudió en Munich, Gotinga y Heidelberg.

En 1923, se licenció en matemáticas y física. En aquel mismo año tuvo la suerte de publicar su libro: solamente cien páginas, pero con una gran densidad de importantes informaciones científicas.

Desde hacía años, Oberth intentaba, aunque sin gran éxito, interesar a los teóricos de la ciencia oficial. Pero ni siquiera su libro consiguió anular totalmente las numerosas objeciones que los científicos de la época hacían a sus audaces teorías, especialmente la encarnizada defensa del empleo de carburantes líquidos.

Entonces, Oberth tuvo la idea de transformar su trabajo para estudiosos en una obra de divulgación, de manera que todo el mundo pudiera comprenderla. A las fórmulas matemáticas unió un argumento sensacional: habló de los viajes interplanetarios que serían realidad en un mañana ya próximo. Todo esto estimuló la fantasía de los lectores, que respondieron con gran entusiasmo a las ideas de Oberth, de manera que su libro se convirtió muy pronto en tema de discusión en toda Europa.

Particularmente, se interesó por él un grupo de hombres de letras, entre ellos Max Valier y Willy Ley, que a partir de entonces se convirtieron en los divulgadores más entusiastas de los principios enunciados por Oberth.

De este modo, en Europa, y sobre todo en Alemania, fue tomando cuerpo una nueva literatura que hablaba de astronáutica: Oberth interesaba a todos. En 1929, seis años después de la aparición del libro, publicó otro. El auténtico protagonista de esta segunda obra era el hombre en el espacio.

ASESOR CINEMATOGRÁFICO

Satélites artificiales y estaciones espaciales habitadas por el hombre eran ya, según el científico alemán, una realidad posible. Aquel mismo año, Oberth participó en una



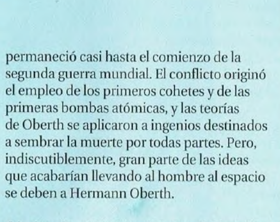
Arriba, El GIRD X, primer cohete soviético con propulsantes líquidos, lanzado el 25 de noviembre de 1933.



Arriba, dibujo del Saturno V, histórico y potentísimo lanzador estadounidense que permitió llevar a cabo las misiones Apolo.

HACIA EL CIELO

El deseo incesante del hombre de volar y conquistar el cielo viene de muy antiguo. Pero sólo a principios de este siglo pudo presumirse factible con los primeros estudios teóricos sobre la propulsión y la construcción de los cohetes pioneros. Hoy, el hombre ha explorado ya la Luna y ha enviado sondas a todo el sistema solar.

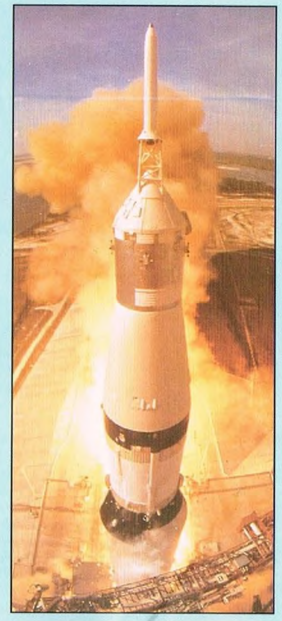


experiencia absolutamente única. El director cinematográfico Fritz Lang le nombró asesor técnico de la película de ciencia-ficción *Una mujer en la Luna*.

Oberth pensó sacar provecho de esta singular experiencia: propuso a la UFA, la productora de la película, la construcción de un verdadero cohete con fines publicitarios.

El proyecto fue aceptado y desde entonces no se hablaba de otra cosa que de la película y del cohete que se estaba preparando y del cual Oberth se ocupaba personalmente. Pero lo que debía haber sido un experimento excepcional acabó en fracaso. El proyecto falló, pero la película tuvo un éxito enorme.

Mientras tanto, Oberth enseñaba matemáticas y física en Mediasch, donde permaneció casi hasta el comienzo de la segunda guerra mundial. El conflicto originó el empleo de los primeros cohetes y de las primeras bombas atómicas, y las teorías de Oberth se aplicaron a ingenios destinados a sembrar la muerte por todas partes. Pero, indiscutiblemente, gran parte de las ideas que acabarían llevando al hombre al espacio se deben a Hermann Oberth.



A la derecha, el histórico despegue del lanzador Saturno V, llevando en la punta el Apolo 11, que puso a los primeros hombres en la Luna.



A la derecha, fotografía histórica tomada el 5 de agosto de 1939 después del lanzamiento, con éxito, de un cohete de Oberth (a la derecha del cohete). El segundo de la derecha es Werner von Braun, que durante la segunda guerra mundial desarrolló las temibles V2.

LOS SATÉLITES PARA EL ESTUDIO DE LA TIERRA

Observando la Tierra desde cotas elevadas, es posible estudiar características geológicas y geofísicas casi imposibles de descubrir desde la superficie terrestre. Por esto, el uso de los satélites está resultando cada vez más indispensable para la prevención y la previsión de catástrofes naturales, la detección de áreas mineralógicamente importantes y el estudio de nuestro planeta desde un punto de vista puramente científico.



Con su capacidad para elevarse a cotas cada vez más altas, el hombre ha creado medios cada vez más sofisticados, capaces de «registrar» los nuevos horizontes que se abren ante sí. Desde las primeras microcámaras hasta los detectores radar de la superficie terrestre instalados en el transbordador, el camino ha sido largo, pero rico en importantes descubrimientos y aplicaciones.

El uso de los satélites ha pasado a tener un papel cada vez más importante también en el estudio de la geología de nuestro planeta, que sirve no sólo para tener de él una imagen científica lo más exacta posible, sino también para aplicaciones muy importantes.

La mayor parte de estos satélites tiene órbitas polares. Por consiguiente, como la Tierra gira bajo ellos, barren todas las áreas que sobrevuelan en períodos de tiempo relativamente breves, del orden de algunos días, de manera que pueden detectar cualquier pequeña transformación o deformación de los suelos, indicadora de eventuales fenómenos geofísicos.

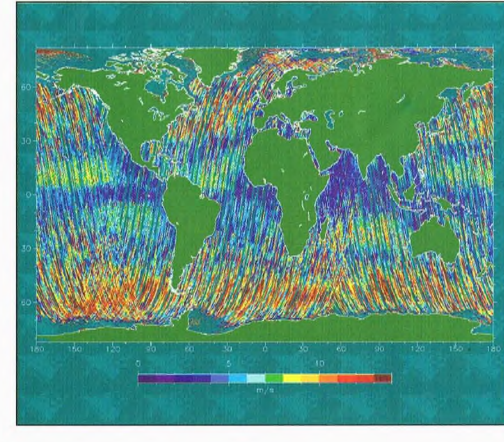
Cuando se aproxima un terremoto, por ejemplo, el área afectada puede sufrir alargamientos o compresiones imperceptibles para el ojo humano, pero no para los sensores de los satélites. Cuando el magma de un volcán tiende a salir a la superficie y amenaza con una próxima erupción, las laderas del volcán se deforman, fenómeno que puede ser registrado por los satélites; cuando en las vertientes de una montaña están a punto de producirse corrimientos de tierras, se manifiestan unos micromovimientos que los satélites de última generación están en condiciones de detectar; una inundación puede afectar con mayor o menor intensidad cierta zona según la capacidad del suelo para absorber el agua, y el uso de los satélites puede determinar también este parámetro.

Pero en el campo de la investigación geológica, los satélites pueden servir también para definir el comportamiento de los estratos o la forma y las dimensiones de algunos cuerpos rocosos en cuyo interior pueden existir yacimientos minerales



A la izquierda, el cuerpo esférico del satélite LAGEOS, sigla de LAser GEOdynamics Satellite, fruto de una colaboración entre Italia y Estados Unidos.

Abajo, imagen, tomada por satélite, con la distribución global de las velocidades de los vientos, determinada gracias al altímetro radar del satélite europeo ERS-2.



y petrolíferos. En este caso, es posible estimar con mucha anticipación y con cierta precisión la cantidad de mineral o de petróleo y gas que podrá extraerse, a fin de evaluar la conveniencia o no de explotar el yacimiento.

Seguidamente se verán unos ejemplos del uso de los satélites para investigaciones geológicas, con algunos descubrimientos y aplicaciones interesantes.

LOS SATÉLITES LAGEOS

Una aplicación del uso de los satélites para el estudio de la tectónica de la Tierra, es decir, los movimientos de las placas en que se divide la corteza terrestre, son los LAGEOS (de LAser GEOdynamics Satellite). El LAGEOS I, lanzado en 1976, y el LAGEOS II, lanzado en 1992, son satélites pasivos –es decir, no efectúan directamente medidas, sino que se limitan a recibir y devolver señales a la Tierra– dedicados a medir distancias por medio de láser. Fueron desarrollados en Italia, en colaboración con Estados Unidos.

Su misión es facilitar el estudio de la dinámica de la corteza terrestre, en constante evolución. Se lanzaron a una cota de 5.900 km y fueron puestos en una órbita inclinada 52° respecto al ecuador.

Una red mundial de observatorios envía brevísimos impulsos de luz láser a los satélites, unas esferas de 60 cm de diámetro cubiertas con 426 prismas retrorreflectores, configurados de manera que devuelven los impulsos láser a la fuente situada en tierra.

De estos prismas, 422 son de silicio fundido, mientras que los 4 restantes son de germanio para permitir mediciones en la franja del infrarrojo, que son utilizadas en estudios experimentales de reflectividad y orientación del satélite.

Con el uso de los LAGEOS es posible conocer cuáles son los desplazamientos de la superficie terrestre, con errores no superiores al centímetro. Estas detecciones son de fundamental importancia también para medir las oscilaciones del eje de rotación de la Tierra, para la determinación precisa de la duración del día –son capaces de registrar variaciones de, aproximadamente, una parte sobre mil millones– y para el estudio de las variaciones de la gravedad terrestre, cuyas oscilaciones ayudarán a comprender mejor los movimientos de las corrientes marinas y de otros importantes fenómenos ambientales. El sistema LAGEOS II, en particular, está formado por dos elementos distintos: el satélite y su fase de apogeo LAS (de Lageos Apogee Stade). Esta fase comprende, además de las estructuras que mantienen unidos el motor de apogeo y el satélite, todos los subsistemas necesarios para actuar y controlar la puesta en órbita operativa, desde el momento de la separación del sistema LAGEOS de la fase de perigeo hasta que el satélite se separa del LAS.

UN TERREMOTO DE 5,1 EN LA ESCALA DE RICHTER VISTO DESDE EL ESPACIO

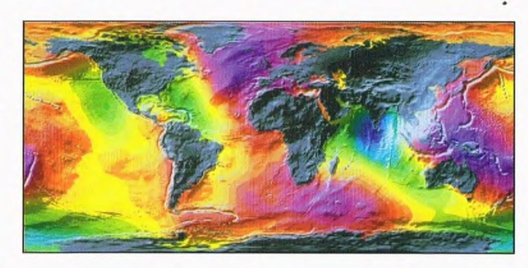
La portada de la revista científica *Nature* del 8 de julio de 1993 mostraba una imagen muy especial de un terremoto que había tenido lugar en el desierto californiano del Mohave 12 meses antes. El artículo, redactado por un grupo de investigadores franceses del CNES, ha sido uno de los resultados más conocidos que se han conseguido con el ERS-1, un satélite europeo para el estudio de la Tierra.

Los cuatro anillos concéntricos que se ven en la imagen son un mapa de los desplazamientos del suelo con un valor máximo de 112 mm en la dirección del satélite (que tiene una inclinación de 23°). El desplazamiento se ha interpretado como una sacudida secundaria de intensidad 5,1 en la escala de Richter, registrada el 4 de diciembre de 1992, 159 días después de una sacudida principal. El diámetro del anillo más externo es de 5 km. La posibilidad de medir los desplazamientos del suelo con una aproximación de milímetros directamente desde el espacio y con una necesidad mínima de inspección ocular ha impulsado a muchas empresas y grupos de todo el mundo a utilizar con mayor frecuencia las posibilidades que ofrecen éste y otros satélites parecidos.

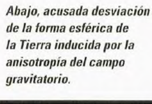
CONOCER LA FORMA DE LA TIERRA POR LA ALTURA DE LOS OCÉANOS

Aunque pueda parecer extraño, la superficie de los océanos no es plana, sino que tiene muchos hundimientos y abultamientos que siguen el fondo oceánico.

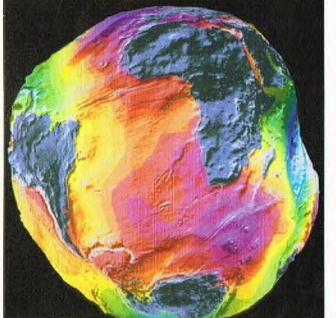
La fuerza de la gravedad de la masa acumulada en las «montañas» que hay en los fondos marinos atrae el agua hacia su cima. La elevación media de la superficie del océano refleja, pues, la topografía de su fondo. Como la Tierra no es perfectamente esférica, su campo gravitatorio no es isótropo, es decir, uniforme, sino que presenta notables variaciones espaciales. Estas variaciones provocan también variaciones en el nivel medio de la superficie del mar, a una escala todavía mayor que la que induce el fondo. Imágenes obtenidas por los satélites han mostrado las variaciones inducidas por la anisotropía del campo gravitatorio. Estas variaciones han quedado reflejadas en diversos colores y han permitido

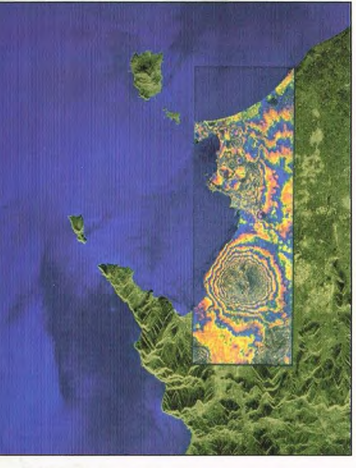


Arriba, esta imagen, tomada por satélite, muestra los hundimientos y elevaciones de los fondos oceánicos.

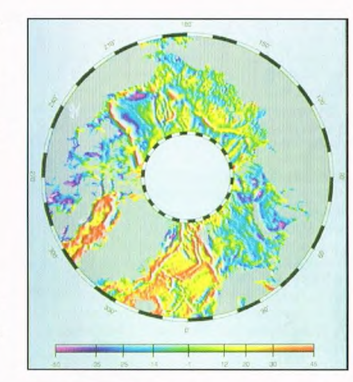


Abajo, acusada desviación de la forma esférica de la Tierra inducida por la anisotropía del campo gravitatorio.





A la izquierda, así aparece el Vesubio desde un satélite. Los círculos concéntricos visibles en el rectángulo se llaman anillos de interferencia y corresponden a las líneas que figuran en los mapas topográficos.



A la derecha, imagen de la zona ártica tomada por satélite. Estudiándola, se ha visto que Alaska ha efectuado una rotación, alejándose de las islas del Ártico canadiense.

obtener una imagen deformada de la Tierra, una exagerada representación de la correspondiente desviación de su forma esférica. La desviación real varía de −105 m (azul) al sur de la India, a +85 m (color añil) al norte de Australia.

EL VESUBIO DESDE EL SATÉLITE

Gracias a los satélites ha sido posible obtener datos interesantes también para la actividad volcánica. Se ha obtenido una imagen del Vesubio mediante una combinación de diversos tipos de planos, tomados desde posiciones de un satélite ligeramente diferentes, con el fin de estudiar la superficie terrestre durante pases consecutivos sobre la misma zona. Estas diferencias de fase, traducidas en una escala de colores, guardan relación directa con la elevación del suelo. Los típicos anillos de interferencia de la imagen obtenida corresponden a líneas de igual altitud en un mapa topográfico. Haciendo tomas sucesivas de las cotas de las laderas del volcán es posible percibir sus eventuales variaciones, posible señal premonitoria de una erupción magmática.

Abajo, imagen, tomada por satélite, con los efectos negativos causados por el desbordamiento del Ródano, ocurrido en 1993.



EL DESBORDAMIENTO DEL RÓDANO

Los desbordamientos del Rhin, el Ródano, el Danubio y muchos otros ríos menores, ocurridos en 1993, se cuentan entre los más graves de los últimos 60 años. Algunos satélites son capaces de determinar el umbral de absorción del agua en el suelo y, en consecuencia, determinar las probabilidades de inundación. Una de las imágenes más significativas sobre este particular muestra la región comprendida entre el Pequeño Ródano y el Ródano, así como la extensión del área inundada el 15 de enero de 1994, poco después de que la rotura de un dique hubiera causado la inundación.

RESUELTO EL ENIGMA DEL ÁRTICO

Dado que gran parte de la zona ártica está permanentemente cubierta de hielo, parecía imposible poder conseguir informaciones del fondo de los océanos tal como se obtenían en los mares libres de hielo. Sin embargo, los científicos aceptaron el reto y hallaron el método para extraer estas informaciones a partir de los datos de altímetros por radar de algunos satélites. Los primeros en salir airosos de este intento fueron los investigadores de un grupo angloestadounidense que utilizaron los datos del ERS-1. Sus resultados son de gran interés no sólo para las prospecciones petrolíferas y mineras, sino también porque contienen una sorpresa científica: la estructura del fondo del océano al norte de Canadá demuestra que Alaska ha ido girando y alejándose de las islas del Ártico canadiense hasta formar una buena parte de la base del propio océano Ártico.



EN EL PRÓXIMO NÚMERO

EL SISTEMA SOLAR

LA ATMÓSFERA DE VENUS

ESTRELLAS Y GALAXIAS

LEJANOS EN EL ESPACIO Y EL TIEMPO

GUÍA DE LAS CONSTELACIONES

EL TRIÁNGULO

CÓMO FUNCIONA EL UNIVERSO

LAS PARADOJAS DE LA LUZ

LA EXPLORACIÓN DEL ESPACIO

SONDAS VENERA A VENUS

EL UNIVERSO

ENCICLOPEDIA DE LA ASTRONOMÍA Y EL ESPACIO



9 788439 554219 10026

$ 3,90

PLANETA DeAGOSTINI



COMPOSICIÓN DE LA OBRA

Volumen 1	Fascículos 1	al	16
Volumen 2	Fascículos 17	al	32
Volumen 3	Fascículos 33	al	48
Volumen 4	Fascículos 49	al	64
Volumen 5	Fascículos 65	al	80

VENTA EN QUIOSCOS

Pida a su proveedor habitual que le reserve un ejemplar de EL UNIVERSO. Adquiriéndolo todas las semanas en el mismo punto de venta facilitará la distribución y obtendrá un mejor servicio.
Las tapas correspondientes a cada volumen se ponen a la venta con el fascículo que cierra el tomo. Con dicho fascículo se entregan las portadillas correspondientes.

Presidente: José Manuel Lara
Director General: Carlos Fernández
Director Editorial: Virgilio Ortega
Director General de Producción: Félix García
Coordinador General: Carles Dorico

© Editorial Planeta Argentina S.A.I.C.
Av. Independencia, 1668 - Capital Federal
Servicio de atención al cliente: Tel. (01) 482 - 0655 y 482 - 0657
Distribuye: Capital: Huesca-Sanabria,
Baigorri, 103, Capital Federal,
Interior: D.G.P., Alvarado, 2118, Capital Federal

© Editorial Planeta Mexicana, S.A. de C.V.
Av. Insurgentes Sur # 1162 - México D.F.
Servicio de atención al cliente: Tel. 575 13 48

© Editorial Planeta Colombiana, S.A.
Carrera, 68, n.º 25-55 - Santa Fé de Bogotá, D.C.
Servicio de atención al cliente: Tel. 9800 - 15315

© Editorial Planeta Chilena, S.A.I.C.
Olivares, 1229 - Santiago de Chile

ISBN Obra completa (con vídeo): 84-395-4148-1
Obra completa (sin vídeo): 84-395-4138-4
Fascículos (con vídeo): 84-395-4149-X
Fascículos (sin vídeo): 84-395-4139-2
Depósito legal: B-47.097-1997

Impresión: Cayfosa, Santa Perpètua de Mogoda, Barcelona
Impreso en España - Printed in Spain - Mayo 1998

Los editores se reservan el derecho de modificar el precio de venta de los componentes de la colección en el transcurso de la misma, si las circunstancias así lo exigieran.
Los editores garantizan la publicación de todos los fascículos que componen esta obra.

Fotografías: Lee Gibbons: cubierta, 116-117, 116ab., 117ar.; ESA/SPL: 107c.der.; E.T. Archive: 106ar.; Galaxy Picture Library: 101, 104, tercera de cubiertas; IGDA: 107ar.der.; Science Photo Library/Julian Baum: 106-107; Dr. Jeremy Burgess: 103 der.; Range: 111; Hugh Rowland: 110; Spectrum: 110, 111; US Naval Observatory: 112ar.izq.; Bristock-IFA: 114-115; BNSC/ESA: 118ab.; ESA: 118-119, 119ab., 120c.; Tony Stone Picture Library: 120ab.
Dibujos: Robin Carter/WLAA: 104-105, 117ab.; David A. Hardy: 102-103; Hugh Rowland: 105, 106ab., 120; Katz: 108-109; Sandra Russell/Black Hat: 112ar.; Julian Baum: 113; Farroxs: 116ar.; Robin Bottel: 115ab.; Spectrum Picture Library: 114ab.

LA ATMÓSFERA DE VENUS

Temperaturas infernales, ácidos que corroen incluso los metales y una presión elevadísima. Así es como se presenta la atmósfera de nuestro planeta gemelo.



La atmósfera de Venus es densa y caliente; pesadas nubes de ácido sulfúrico cubren permanentemente el cielo del planeta y sobre la superficie se ejerce una presión 90 veces mayor que la terrestre. El efecto invernadero ha convertido el suelo y los estratos más bajos de la atmósfera en uno de los lugares más calientes de todo el sistema solar.

Medidas efectuadas por las sondas indican que la temperatura cambia pocos grados del ecuador al polo, que la temperatura atmosférica permanece constante incluso durante las largas noches del planeta y que no hay variaciones estacionales o gradientes de temperatura en función de la latitud.

COMPOSICIÓN DE LA ATMÓSFERA

Los datos procedentes de las sondas enviadas a Venus indican que el constituyente principal de la atmósfera es el dióxido de carbono (más del 96%), con pequeñas cantidades de nitrógeno, oxígeno, argón, dióxido de azufre y vapor de agua.

Al tratarse de moléculas muy complejas, la columna de gas situada encima de 1 m^2

En este dibujo, la sonda Pioneer-Venus atraviesa la atmósfera de Venus con su carga de pequeñas sondas destinadas a analizar las características de este ambiente hostil.

de terreno pesa mucho y la presión en la superficie es de unas 90 atmósferas.

Es interesante comparar la atmósfera de Venus con la de la Tierra y sus respectivas evoluciones. Para hacerlo es necesario medir los gases inertes, los cuales, como apenas reaccionan, han mantenido las mismas proporciones desde la época de formación del planeta; es necesario, por tanto, analizar una muestra de la atmósfera.

Por ejemplo, la cantidad de kriptón presente en la atmósfera de Venus es muy superior a la esperada y a la que está presente en la Tierra. Es posible que Venus recibiera una gran cantidad de gases diferentes al comienzo de la historia del sistema solar, cuando el viento solar era más denso que hoy. La presencia de material del protoplaneta hizo de escudo para los planetas más alejados del Sol, la Tierra y Marte, impidiendo que en estos últimos pudiera haber una cantidad comparable de gases nobles como el kriptón, el xenón y el argón.

Venus posee tres veces más kriptón que la Tierra y 700 veces más argón primordial que kriptón. Comparando esta proporción con la que existe en la Tierra o en Marte descubriremos que ésta es sólo de 30 a 1. Al Sol, por otra parte, le corresponde una proporción de 2.000 a 1, lo que induce a pensar que los gases nobles proceden del Sol, formando un estrato que rodeaba los granos de polvo de la nebulosa protosolar.

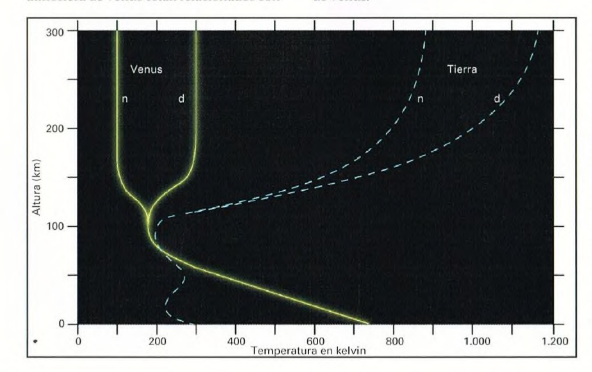
El nitrógeno atmosférico del planeta es unas tres veces el valor terrestre. No obstante, la cantidad total de nitrógeno es del mismo orden de magnitud en los dos planetas porque en la Tierra la mayor parte de este gas está incorporado a las rocas de la corteza.

Otros componentes importantes de la atmósfera de Venus están relacionados con la química y los procesos de formación de las nubes. La distribución de H_2S, SO_2 y H_2O está asociada con el ciclo del azufre y con la producción de gotas de ácido sulfúrico en las distintas capas de nubes. La cantidad de agua es muy pequeña: equivale a 10^{-5} veces la masa de los océanos terrestres.

La diferencia de condiciones existentes en la superficie de los dos planetas se debe también a la pequeña cantidad de agua producida en la atmósfera originaria de Venus.



Arriba, imagen de Venus tal como se presentó a la sonda Pioneer.



ESTRUCTURA ATMOSFÉRICA

Las sondas enviadas al planeta en el transcurso de los años han suministrado preciosas informaciones sobre la estructura de la atmósfera. Las medidas de la Pioneer-Venus comenzaron a una altura de 200 km; también se realizaron observaciones en la banda comprendida entre 60 y 140 km de altitud, una región que anteriormente no había sido estudiada en profundidad. Todos estos datos ponen de manifiesto una peculiaridad de la atmósfera de Venus respecto a la terrestre: mientras que en nuestra atmósfera hay regiones definidas, caracterizadas por cambios de signo del gradiente de temperatura, en Venus hay que distinguir entre el lado iluminado y el nocturno. En el primer caso existe una termosfera de tipo terrestre, con temperaturas comprendidas entre –90 °C (a 100 km de altitud) y unos +27 °C (en la exosfera). En el segundo caso la termosfera no existe y la temperatura disminuye, pasando de –90 °C (a 100 km) a –170 °C (a 150 km). La transición de la temperatura entre los lados diurno y nocturno es brusca.

Entre los 100 km y la capa superior de las nubes (a 70 km) la temperatura varía mucho. A 95 km de altitud se han observado fluctuaciones de unos 25 °C. Dado que el 90% de la atmósfera se encuentra entre

A la izquierda, gráfico que muestra el perfil de la temperatura de la Tierra y de Venus al variar la altura;* n *y* d *representan los perfiles nocturno y diurno.



Arriba, otra imagen de Venus elaborada por ordenador. Las formaciones atmosféricas muestran una estructura compleja.

la superficie y una altitud de 28 km, esta banda resulta densa y compacta como resultado del calentamiento solar. No hay diferencia de estructura general en esta banda atmosférica a distintas latitudes. A partir de los 28 km de altitud empiezan a manifestarse diferencias de temperatura sobre las distintas áreas. En la parte alta de la troposfera los procesos asociados a la producción y disipación de las nubes actúan de manera diferente según las regiones.

EL EFECTO INVERNADERO

Medidas efectuadas con distintos instrumentos confirman que la temperatura de la superficie de Venus es de unos 475 °C. La causa reside en la densa y compacta atmósfera del planeta y en su composición. El porcentaje de dióxido de carbono presente es superior al de las rocas calcáreas terrestres; al moverse Venus por una órbita más próxima al Sol, el calor ha recalentado la superficie del planeta, liberando el dióxido de carbono de las rocas y aumentando la opacidad de la atmósfera.

La atmósfera deja pasar la radiación solar, que calienta la superficie, pero no los rayos infrarrojos reemitidos por el suelo, lo que produce un aumento ulterior de la temperatura. Este mecanismo se llama efecto invernadero y se detiene sólo cuando la atmósfera y la superficie están en equilibrio, pero a tales temperaturas el agua se encuentra en estado de vapor y no puede condensarse en océanos.

El dióxido de carbono sólo es responsable del 55% del efecto invernadero; otro 25% es debido al vapor de agua y la parte restante depende de las nubes que rodean el planeta.

A la derecha, gráfico que muestra la presión y la temperatura de la atmósfera de Venus en función de la altitud. La temperatura se lee en la banda que atraviesa el dibujo.

mi: 75, 50, 25
km: 125, 100, 75, 50, 25
200 400 600 800 (0 °C = 273,15 K)
atm: 0,005 0,05 0,5 2 5 10 20 50

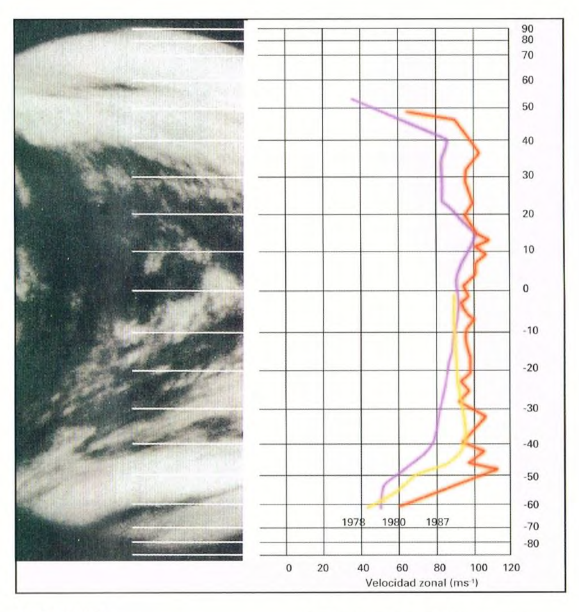
DATOS

COMPARACIÓN DE LA COMPOSICIÓN ATMOSFÉRICA DE LA TIERRA Y DE VENUS

	Tierra	Venus
N_2	0,79	3
O_2	0,20	<0,002
Ar	0,009	trazas
CO_2	0,0003	86
H_2O	~0,002	~0,01
Total	1,00	90

Las cifras se refieren al número de moléculas por m³ suponiendo igual a 1 el número total de moléculas por m³ en la atmósfera terrestre.

En los últimos decenios, el aumento del uso de combustibles fósiles y la deforestación han provocado un aumento del porcentaje del dióxido de carbono en la atmósfera terrestre. El fenómeno, que todavía no ha provocado efectos relevantes, en el futuro podría llevar a un aumento de la temperatura media de la superficie de nuestro planeta, con todas las consecuencias imaginables.



Arriba, la imagen y el gráfico muestran la velocidad de los vientos a varias latitudes medidos respecto a la rotación del planeta en tres años distintos.

LAS NUBES

La atmósfera de Venus aparece dividida en varias zonas, con nubes de diversa composición y estructura. En la parte alta de la atmósfera hay una capa de niebla formada por gotas de ácido sulfúrico de diámetro pequeñísimo; esta neblina no es permanente, sino que aparece y desaparece a lo largo de períodos de varios años.

Debajo, entre los 47 y los 52 km de altura, hay una banda de nubes de ácido sulfúrico condensado en gotas de tamaño mayor y también en forma de partículas sólidas; a esta altitud la densidad es elevada y por tanto la visibilidad muy escasa. Por debajo de los 32 km la atmósfera debería carecer de partículas sólidas. De todos modos, la densidad sigue siendo tan elevada que el horizonte visible queda muy restringido.

En la parte alta de la atmósfera existe una fuente de azufre y ácido sulfúrico de naturaleza fotoquímica que requiere la presencia de los rayos ultravioletas (que no llegan a alcanzar los estratos inferiores). Las gotas de ácido sulfúrico se diluyen en las regiones más bajas, donde encuentran moléculas de agua. El tamaño de estas partículas es importante porque regula las precipitaciones en Venus; cuanto mayor es este tamaño mayor es la probabilidad de lluvias.

LOS RAYOS

Un descubrimiento sorprendente ha sido la presencia de rayos bajo la cubierta nubosa. Las dos sondas soviéticas Venera 11 y Venera 12 han registrado, en la capa comprendida entre 32 y 2 km de altitud, señales electromagnéticas iguales a las emitidas durante un temporal terrestre.

Los rayos son mucho más intensos que los nuestros y se suceden muy rápidamente; se han llegado a detectar 25 descargas por segundo. Podemos deducir que muy probablemente en las capas más bajas de la atmósfera venusiana hay cristales de agua y un rápido movimiento vertical de las masas de aire.

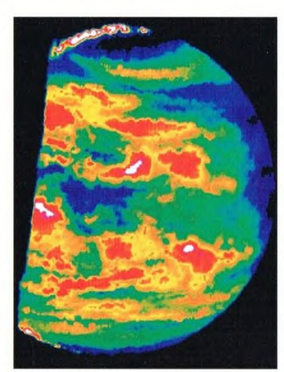
Los rayos también podrían estar asociados a los volcanes y una prueba en dicho sentido nos la proporciona la sonda Pioneer-Venus, que ha observado un número muy grande de rayos sobre los volcanes de Beta Regio, una región de Venus.

MORFOLOGÍA DE LAS NUBES

Si bien Venus aparece usualmente como un disco privado de características, al observarlo al ultravioleta muestra una amplia variedad de estructuras nubosas en rápida rotación en la parte alta de la atmósfera venusiana. Los datos enviados por las sondas han evidenciado una morfología significativa de las nubes sobre el polo Norte. Se han observado dos zonas claras en las nubes sobre la vertical del polo que giran alrededor del centro con períodos de 2-7 días; se cree que constituyen la prueba del movimiento de descenso de la atmósfera hacia el centro del vórtice polar. La falta de movimientos similares en otras partes confirma la hipótesis de que al nivel de las nubes más altas del hemisferio norte hay una sola gran célula de circulación. Hay también células más pequeñas (500-1.000 km de diámetro) que muestran una oscilación en su orientación hacia los paralelos geográficos. Encima de las regiones ecuatoriales hay además vientos locales con velocidades del orden de 360 kilómetros por hora.

CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA

Como se ha dicho, la parte más alta del estrato nuboso gira a gran velocidad.



Arriba, imagen con falsos colores de la atmósfera de Venus. Las zonas rojas son las que están a mayor temperatura.

El período de rotación es de unos 4 días, pequeño en comparación con el de la superficie del planeta, que es de 243 días; la diferencia es la mayor de todos los cuerpos del sistema solar.

Seguramente debe de haber un mecanismo capaz de explicar estos vientos fortísimos que soplan en dirección contraria de forma más veloz que en los puntos de la superficie. La respuesta está relacionada con la composición de la alta atmósfera, que absorbe la casi totalidad de la energía solar incidente y suministra la energía necesaria para estos movimientos rápidos a través del transporte de calor en células convectivas. Las sondas han puesto de manifiesto en las nubes unas estructuras (en forma de remolino) a escala pequeña que son importantes para el transporte de la energía y para el momento de rotación de la atmósfera. Para que la rotación atmosférica sea tan rápida es necesario que no haya mecanismos (habitualmente ligados a una lenta rotación planetaria) que disipen el calor. En la Tierra son imposibles estas corrientes tan rápidas porque la mayor parte de la energía disponible es absorbida por el terreno.

La velocidad aumenta en ambos hemisferios al acercarse al ecuador, donde la rotación puede producirse en sólo dos días. Unas estrías en las nubes muestran un flujo hacia los remolinos polares, donde se disipa la energía cinética de rotación.

Los vientos se van debilitando a medida que la altura decrece: partiendo de un valor de 360 km/h en los altos estratos nubosos, descienden a 180 km/h a 50 km de altitud para llegar a unas pocas decenas de kilómetros por hora en la superficie.

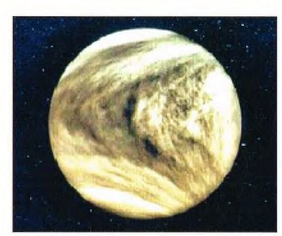
La estratosfera de Venus no está claramente definida; en la Tierra esta región la crea la absorción de la energía solar por parte del ozono, pero en Venus no parece haber un proceso equivalente. Otra diferencia entre las dos atmósferas consiste en que la estratosfera en Venus depende de la morfología y de los procesos radiativos de las nubes, que en este planeta son ubicuas.

CONCLUSIONES

El estudio de la atmósfera de Venus ha contribuido también a otros campos. Los datos sobre la composición de la atmósfera han permitido ampliar nuestros conocimientos sobre la formación del sistema solar y las medidas de las capas atmosféricas más bajas han confirmado las consecuencias derivadas de un efecto invernadero muy acentuado; por último, se han esbozado los problemas fundamentales de la contaminación atmosférica.

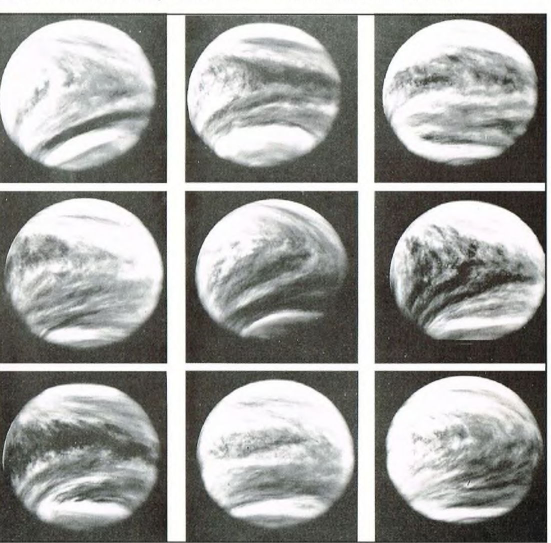
La atmósfera venusiana ha revelado una estructura muy diferente de la terrestre, con temperaturas elevadas en la superficie y bajas a gran altitud, en contraste con la nuestra, que es más fría en el suelo que en las capas superiores. La superficie de Venus presenta una temperatura en el suelo de 475 °C, mucho más alta que la de nuestro planeta, pero en las capas superiores la atmósfera alcanza unos valores netamente inferiores a los 500 °C característicos de los correspondientes estratos de la atmósfera terrestre.

La circulación es mucho más compleja de lo que se creía antes del envío de las sondas; no está ligada a un solo flujo circular clásico sino que está influida por el rápido movimiento de la banda alta y por la energía transportada por los remolinos locales.



Arriba, la atmósfera de Venus tomada en el ultravioleta. Son visibles las estructuras nubosas en movimiento.

Abajo, en esta secuencia de imágenes que cubren un arco de ocho días se consigue advertir la rotación de las nubes más altas.



LEJANOS EN EL ESPACIO Y EN EL TIEMPO

En nuestra vida cotidiana no es posible volver atrás en el tiempo. Los astrónomos, en cambio, pueden realizar extraordinarios viajes temporales. Sus máquinas del tiempo son los telescopios.

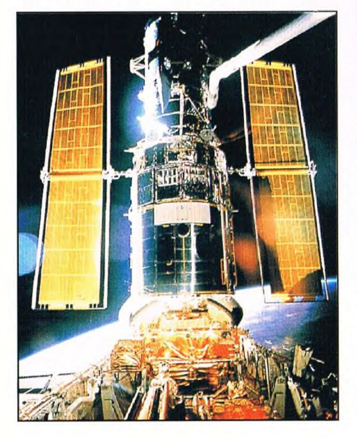


Cuando observamos objetos celestes que se encuentran a una cierta distancia de nosotros, debemos tener en cuenta que lo que vemos no es un aspecto del cuerpo como es ahora sino como era cuando la luz partió de él. Si, por ejemplo, miramos un cúmulo globular que se encuentra a 10.000 años luz de nosotros, lo veremos como era hace 10.000 años, no como es actualmente. Esto es así porque la luz tiene una velocidad finita de unos 300.000 km/s y por lo tanto emplea un cierto tiempo en recorrer las distancias. Nosotros, en la vida de cada día, no nos damos cuenta porque nuestras distancias son muy pequeñas comparadas con las astronómicas.

El hecho puede parecer bastante extraño. Pero pensando con atención se advierte que el fenómeno puede permitir extraordinarios viajes hacia atrás en el tiempo. En efecto, cuanto más lejanos son los objetos observados, más alejados están también en el tiempo. Así, cuando miramos galaxias situadas a distintas distancias de nosotros, no sólo tenemos informaciones de tipo espacial, sino también visiones del universo en épocas distintas. En la historia de la astronomía el hombre ha construido unos telescopios cada vez mayores y más potentes para ver más lejos y hacer retroceder el límite del universo observable.



Arriba, los cúmulos globulares son sistemas estelares que contienen las estrellas más viejas de una galaxia porque nacieron en las primeras fases de contracción de la nube protogaláctica.



A la izquierda, el telescopio espacial Hubble, gracias a su peculiar posición en órbita terrestre, es el único instrumento capaz de sondear las regiones más lejanas del universo conocido.

LAS MÁQUINAS DEL TIEMPO

Cuanto más capaz es un telescopio de realizar observaciones profundas, es decir de identificar objetos débiles y lejanos, más nos permite retroceder en el tiempo. En el límite, se podría decir que si lográramos fabricar un telescopio tan potente que mirara lejísimos en el espacio, y por lo tanto lejísimos en el tiempo, podríamos aproximarnos a la observación del nacimiento del universo, es decir, del propio Big Bang.

En este sentido, la puesta en órbita del telescopio espacial Hubble ha constituido un extraordinario paso adelante respecto a las observaciones de los

telescopios en tierra. El Hubble puede ver galaxias 10 veces más débiles de las que logran observar los más modernos telescopios que hoy operan en tierra. El telescopio espacial puede considerarse, con razón, como una verdadera máquina del tiempo.

VIAJAR HACIA EL PASADO CON EL HUBBLE

Una de las razones fundamentales del proyecto y construcción del telescopio espacial ha sido precisamente medir las dimensiones y la edad del universo con el fin de confirmar las actuales teorías sobre el origen del cosmos, y en primer lugar la del Big Bang. Una teoría cosmológica que trate de explicar cómo se originó el universo debe dar cuenta de las observaciones y en particular de la distribución de las galaxias en las regiones próximas o alejadas de nosotros. Ya se ha visto que las galaxias no están dispuestas aleatoriamente sobre la esfera celeste, sino que la mayoría están agrupadas en cúmulos. Conviene tener en cuenta, sin embargo, que cuanto más lejanas son las galaxias que miramos más jóvenes son, pues la luz que nos llega partió de ellas hace miles de millones de años. Esto significa que para poder comparar los resultados teóricos con las observaciones astronómicas hay que realizar una corrección apropiada debido a que las galaxias, al envejecer, cambian de aspecto y sufren modificaciones, como cualquier objeto del universo. La observación de galaxias cada vez más distantes, por tanto, nos permite ver un universo, por así decirlo, «fósil». Es muy parecido a lo que hace un arqueólogo cuando excava cada vez más profundamente en el suelo en busca de restos

Arriba, el observatorio de Kitt Peak, en Estados Unidos, alberga un telescopio de 4 m, uno de los más grandes del mundo.



A la izquierda, foto del cúmulo globular 47 Tucanae, obtenida con el telescopio de 1,5 m del observatorio de Cerro Tololo, en Chile.



A la izquierda, una extraordinaria imagen que fue tomada a fines de 1995 por el telescopio espacial Hubble, con una exposición de varios días, aprovechando las vacaciones navideñas, durante las cuales el telescopio no realizaba otras misiones. Una exposición tan larga ha permitido identificar un campo excepcionalmente rico en galaxias en una región que siempre se había visto vacía con los telescopios en tierra.

de asentamientos desaparecidos. Cuanto más profunda es la capa descubierta más antigua es la civilización que la produjo.

¡FANTÁSTICO DEEP FIELD!

Pero, ¿hasta dónde hemos logrado ver hasta el momento? La imagen más profunda que los astrofísicos han obtenido hasta hoy procede del telescopio espacial Hubble y ha sido llamada *Deep Field*, que en inglés significa «campo profundo». Se trata del resultado de 342 exposiciones distintas tomadas con la cámara del telescopio espacial Wide Field and Planetary Camera 2 (WFPC2), en 10 días consecutivos entre el 18 y el 28 de diciembre de 1995. Se trata de una observación realmente sensacional. En esta imagen se ven galaxias hasta una magnitud cercana a 30. Recordemos que la magnitud es un índice de la luminosidad de los objetos y que cuanto mayor es más débil es el objeto celeste; teniendo en cuenta que el ojo humano sólo logra ver objetos hasta aproximadamente la sexta magnitud, se puede decir que las galaxias del *Deep Field* son objetos miles de millones de veces más débiles de lo que puede ver nuestro ojo. Esto significa que las galaxias vistas por el Hubble son tan jóvenes que, temporalmente, distan poquísimo del Big Bang. La decisión de que el telescopio espacial realizara las observaciones más profundas nunca obtenidas fue tomada por el director del Space Telescope Science Institute (STSI), Robert Williams, quien decidió utilizar 150 órbitas consecutivas del telescopio espacial para observar una única porción del cielo, siempre la misma, a fin de lograr una profundidad de observación sin precedentes. Cada exposición duraba *grosso modo* entre 15 y 40 minutos. El Hubble tomó imágenes de esta región de la esfera celeste

LA VIDA DE LAS GALAXIAS

Mirar cada vez más lejos significa ver objetos cada vez más jóvenes. El hecho es de enorme importancia para reconstruir la vida de las galaxias, desde su nacimiento hasta su estado actual. El estudio de la formación y la evolución de las galaxias ha experimentado en los últimos años un notable avance no sólo gracias al Hubble, sino también a los demás instrumentos que han permitido la observación de galaxias a longitudes de onda distintas de la de la luz visible (más cortas y energéticas, como los rayos gamma, X o ultravioletas, o más largas, como las radiaciones infrarroja y radioeléctrica). Es muy importante analizar las radiaciones de distinto tipo que recibimos de una galaxia, pues nos informan de procesos energéticos de distinta naturaleza que tienen lugar en el interior de una galaxia y tal vez determinan su evolución.

con diferentes filtros, en el ultravioleta, el azul, el rojo y el infrarrojo. Estas exposiciones fueron combinadas y sumadas para obtener una imagen única coloreada y muy profunda. Como región del cielo se eligió aquella que, en imágenes anteriores tomadas con el propio Hubble o con el telescopio de 4 m del observatorio de Kitt Peak, estaba privada más que ninguna otra de objetos que pudieran impedir obtener una notable profundidad. La porción del cielo cubierta por el *Deep Field* es más bien limitada. No obstante, se la cree representativa de cómo están realmente distribuidas las galaxias del universo, porque la distribución de materia a gran escala debería ser más o menos la misma en todas las direcciones de observación. Las galaxias que se reconocen en esta imagen

El universo se expande. Las galaxias se alejan de nosotros a una velocidad mayor cuanto mayor es su distancia. ¿Pero esta expansión se detendrá un día o proseguirá hasta el infinito? Las imágenes superiores muestran cuásares, algunos de los objetos más lejanos del universo, cuya estructura se ha podido determinar.

Abajo, una imagen de M83, una galaxia espiral de la Hidra.



son unas 1.500, correspondientes a diversos tipos morfológicos, distintas edades y diferentes estadios evolutivos. Se puede decir que el *Deep Field* contiene informaciones que nos transportan a distintas épocas de la evolución del universo. De este modo es posible obtener importantísimas noticias sobre la historia de la evolución de las galaxias. El Hubble ha permitido a los astrónomos estudiar por primera vez las características de las galaxias más jóvenes y obtener importantes informaciones para la comprensión de cómo se forman estos objetos celestes.

LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO

Una observación tan profunda como el *Deep Field*, que nos lleva a descubrir galaxias tan jóvenes, puede llevar a importantes conclusiones sobre la cuestión cosmológica, todavía en discusión, de si el universo es abierto o cerrado. Si el universo fuera abierto habría una continua expansión debida al hecho de que no hay la densidad de materia necesaria para que la fuerza gravitacional logre frenar la expansión. Si, por el contrario, fuera cerrado, llegaría un momento en que se asistiría a la detención de la expansión y a una subsiguiente contracción del universo. A través del *Deep Field* se puede llegar a comprender cómo están distribuidas las galaxias en el universo. Estos datos de observación podrán confrontarse con las teorías de los distintos tipos de universo. Tal vez se pueda llegar a establecer entonces cuál de los modelos de universo encaja mejor con la distribución real de la materia del cosmos.

LA FORMACIÓN DE LAS GALAXIAS

Los astrónomos analizan el *Deep Field* con múltiples objetivos. Los resultados de este inmenso trabajo de análisis sólo se conocen en parte, y algunas tareas todavía no han sido llevadas a cabo. Los datos pueden utilizarse para realizar un estudio estadístico sobre cómo están distribuidas en el cielo las galaxias. Además, el análisis de los datos obtenidos es valiosísimo para tratar de comprender cómo se forman las galaxias, estos ladrillos fundamentales del universo.

Las galaxias suelen clasificarse en tres grandes categorías: las espirales, las elípticas y las irregulares, por referencia a la forma que presentan cuando las observamos en el intervalo visible del espectro electromagnético.

Mientras que las galaxias espirales tienen todavía gas y materia interestelar utilizable para producir nuevas estrellas, las elípticas han agotado desde hace tiempo su reserva de materia para nuevas estrellas. Por esto están formadas esencialmente de estrellas muy viejas, mientras que en las espirales hay también estrellas jóvenes y otras recién nacidas. Las estrellas viejas tienen colores que tienden al rojo, mientras que las jóvenes, al ser más calientes, son más azules. Ésta es la razón por la que las galaxias elípticas aparecen rojas. Parece que las galaxias espirales siguen formando nuevas estrellas principalmente en los brazos, donde la densidad de materia interestelar es mayor que en el resto de la galaxia. La observación de las espirales en distintas épocas a través del telescopio espacial puede confirmar o no la visión actual relativa a este tipo de galaxias. En efecto, si bien sabemos describir las características de los distintos tipos de galaxias, todavía ignoramos cómo se han originado. En particular, es un problema sin resolver saber si hay alguna relación evolutiva entre ellas: por ejemplo, si las galaxias elípticas derivan de las espirales o es más bien al contrario. Podría ocurrir también que los distintos tipos de galaxias nacieran y se desarrollaran independientemente, sin ningún tipo de relación entre sí. Las galaxias elípticas, al contrario que las espirales, están compuestas sólo de estrellas muy viejas y han agotado deprisa la materia necesaria para la formación de estrellas. Actualmente se plantean varias hipótesis acerca de la formación de estas galaxias. Algunos astrofísicos tienden a considerarlas como el producto de la colisión y de la subsiguiente fusión de otras galaxias. Como el *Deep Field* muestra muchísimas, el análisis de los datos será de fundamental importancia para reconstruir su vida. Las imágenes obtenidas con el telescopio espacial parecen confirmar que en una época lejanísima del pasado, cuando la edad del universo era una décima parte de la actual, las galaxias elípticas tenían casi la misma forma y las mismas características que las elípticas que conocemos. Esto lleva a pensar que este tipo de galaxias se formaron poco después del Big Bang y que llevaron una existencia más bien tranquila, consistente en la pura y simple evolución de las estrellas que las componían desde el comienzo. La vida de las galaxias espirales, en cambio, parece un poco más difícil y compleja. En algunas exposiciones del telescopio espacial hay un gran número de objetos débiles y extraños que podrían constituir los embriones de las galaxias espirales. También nuestra Galaxia, que es espiral, pudo haberse constituido a partir de objetos de este tipo.



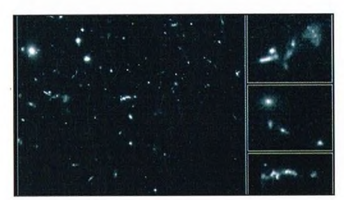


Arriba, una imagen de M87, la enorme galaxia elíptica que domina el cúmulo de Virgo.
Abajo, una fotografía de M82, una galaxia irregular de la Osa Mayor, tomada en el infrarrojo por el satélite IRAS.

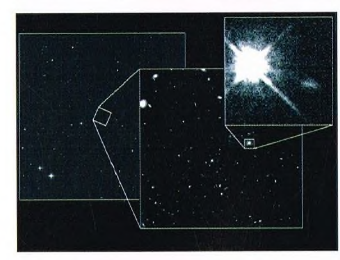


GALAXIAS PRIMORDIALES

Las imágenes del telescopio espacial permiten realizar un estudio en profundidad sobre las galaxias



A la izquierda, cúmulo de galaxias jóvenes próximo a 3C 324. El Hubble ha conseguido ver mucho más lejos en el espacio y, por lo tanto, en el tiempo. Aquí se muestran algunas de las galaxias jóvenes que han sido observadas.



Al lado, ampliación de un lejano cúmulo de galaxias del Escultor, situado a 12.000 millones de años luz.

primordiales. El Hubble nos ha mostrado por primera vez que, retrocediendo cada vez más en el tiempo, se encuentra una extrema variedad de objetos galácticos, de los cuales parece emerger un cuadro del origen y la evolución de las galaxias espirales mucho más complejo y violento que el de las galaxias elípticas. En algunos cúmulos muy densos de galaxias, las galaxias espirales podrían ser fácilmente destruidas por interacciones con otras galaxias, lo cual llevaría a la formación de objetos galácticos de extraña forma, probablemente resultado de la perturbación debida a interacciones gravitacionales con otras galaxias. En los años setenta surgió un problema relativo a la evolución de las galaxias: parecía que en los cúmulos lejanos había una sobreabundancia de galaxias azules respecto a la época actual. El hecho de que una galaxia aparezca azul significa que contiene estrellas jóvenes y masivas en formación. Además, las imágenes de estas galaxias azules aparecían más bien distorsionadas y a veces con múltiples núcleos. Probablemente, la existencia de este tipo de núcleos es lo que queda de antiguas colisiones entre galaxias. Según los resultados del telescopio espacial, parece que la mayoría de estas galaxias azules son galaxias espirales cuyas interacciones pasadas con algunas galaxias han favorecido la formación de nuevas estrellas de gran masa. De estas recientes observaciones parece deducirse que las galaxias elípticas permanecen casi inalteradas durante la mayor parte de la vida del universo, mientras que las galaxias espirales atraviesan fases violentas en el curso de su evolución. El paso siguiente para el telescopio espacial será retroceder todavía más en el tiempo para observar directamente las galaxias mientras se están formando.

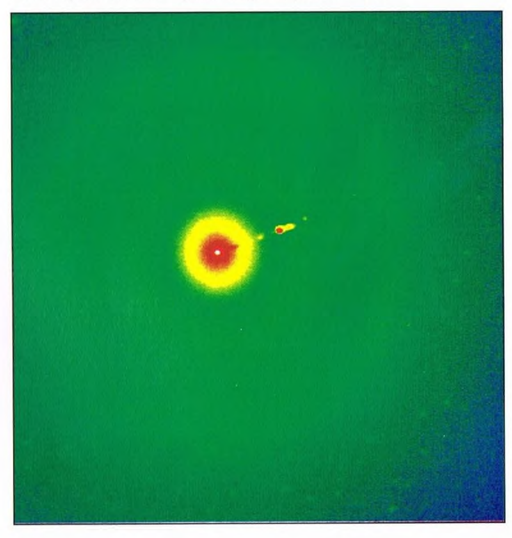
GRUPOS, CÚMULOS Y SUPERCÚMULOS

La mayoría de las galaxias se encuentran formando grupos o cúmulos. Los grupos son conjuntos de decenas de galaxias. También nuestra Galaxia pertenece a un grupo, el llamado Grupo Local.
Existen también agrupaciones formadas por un número más elevado de galaxias, de varios cientos a varios miles. Estas agrupaciones se llaman cúmulos.
Son famosos los cúmulos de Virgo y el de la Cabellera de Berenice.
Los cúmulos se agrupan a su vez en supercúmulos, que son las estructuras más vastas de las que se tiene noticia y se disponen formando unos filamentos que constituyen el entramado de la materia cósmica.

DESARROLLOS FUTUROS

Hasta ahora el telescopio espacial nos ha permitido llegar muy lejos en el espacio y también en el tiempo. El análisis de la enorme cantidad de datos que este extraordinario instrumento nos está suministrando cada día está hoy a disposición de la comunidad astrofísica internacional. El análisis todavía no ha terminado y el Hubble, con su potentísimo ojo apuntando a las profundidades del universo, promete seguir sorprendiéndonos.

Abajo, la galaxia M87. Se cree que una galaxia se forma como consecuencia del colapso gravitacional de una nube de materia interestelar. Se ignora todavía si existe o no un vínculo evolutivo entre los distintos tipos de galaxias existentes, espirales y elípticas, o si estos diversos tipos de objetos nacen independientemente.



EL TRIÁNGULO

Cerca de la constelación de Andrómeda se encuentra el Triángulo, un asterismo ya observado en la Antigüedad.



Pese a su nombre, que hace referencia a una figura geométrica abstracta y podría dar a entender un origen reciente, el Triángulo fue introducido en épocas remotas. Los griegos lo llamaban *Deltoton*, los romanos *Triangulum* y los árabes *Al Muthallath*, palabras todas que significan triángulo. La razón del nombre es obvia: las estrellas más luminosas de la constelación forman un triángulo alargado.

CÓMO LOCALIZAR LA CONSTELACIÓN

El Triángulo está situado pocos grados al sur de Gamma *Andromedae*. Los astros que lo componen son relativamente poco brillantes, pues sus magnitudes van de la tercera en adelante.

ESTRELLAS PRINCIPALES

Alfa (magnitud 4,3) o Caput *Trianguli*, el vértice del triángulo, es una estrella cuya temperatura superficial es un poco superior a la del Sol y su luz aparece de color blanco. La letra que la identifica, sin embargo, no debe llevar a engaño: la estrella más luminosa de la constelación es Beta (magnitud 3), de características espectrales similares a Alfa.

La estrella que lleva el número de Flamsteed 6, pero que en algunos atlas se llama también Iota, es doble, formada por dos estrellas de magnitudes 5,3 y 6,9 situadas a unos 4" de distancia. Basta, por tanto, un pequeño instrumento para separarlas. Métodos espectroscópicos revelan que ambas componentes tienen compañeras invisibles, situadas a distancias demasiado pequeñas para que el telescopio más luminoso pueda resolverlas. Estamos, pues, en presencia de un sistema cuádruple. R *Trianguli*, en cambio, es una estrella cuya luminosidad varía desde el umbral de luminosidad a simple vista hasta valores que exigen instrumentos de gran apertura. Este astro pasa de la magnitud 5,4 a la 12,6 en 266 días. Se trata, pues, de una variable de período largo que pertenece al mismo tipo que la estrella llamada Mira (Maravillosa), en la constelación de la Ballena. Este tipo de astros están caracterizados por una temperatura superficial muy baja, y por tanto por una luz rosácea, un tamaño gigantesco, y por el hecho de pulsar con períodos de cientos de días.



Arriba, la galaxia M33, además de ser el único objeto notable de la constelación del Triángulo, es uno de los mayores elementos del Grupo Local.

LA GRAN GALAXIA DEL TRIÁNGULO

El Triángulo merece una atenta observación por la presencia entre sus límites de una de las grandes galaxias del Grupo Local, la familia de objetos a la cual pertenecen la Vía Láctea y M31, en la galaxia de Andrómeda.

Se trata de M33, una galaxia en forma de espiral y visible casi de frente. Su tamaño aparente es considerable: su extensión en la bóveda celeste es mayor que la de la Luna llena. No obstante, el objeto no es tan fácil de observar como este dato da a entender; es necesario un cielo muy limpio y unos prismáticos para poder observar esta galaxia como una mancha de luz redondeada de séptima magnitud.

La galaxia M33 está a una distancia de unos tres millones de años luz de nosotros; por tanto es un poco más lejana que M31.

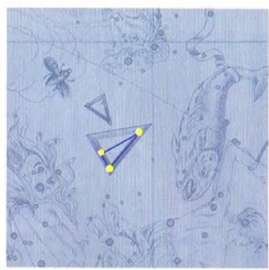
Dentro de la constelación del Triángulo también se encuentran otras dos galaxias pero muy débiles, en torno a la décima magnitud.



LOS MITOS Y LAS ESTRELLAS

EL TRIÁNGULO

La constelación del Triángulo tiene orígenes antiguos, pues es citada por varios autores griegos que le atribuyen distintos significados. Según algunas fuentes, la constelación representa el imponente delta del Nilo, que en la Antigüedad era considerado el río más grande del mundo.
Según otras, sería Sicilia, la isla de característica forma triangular cuyo nombre era Trinacria, y sede de Ceres, la mitológica diosa de las cosechas.

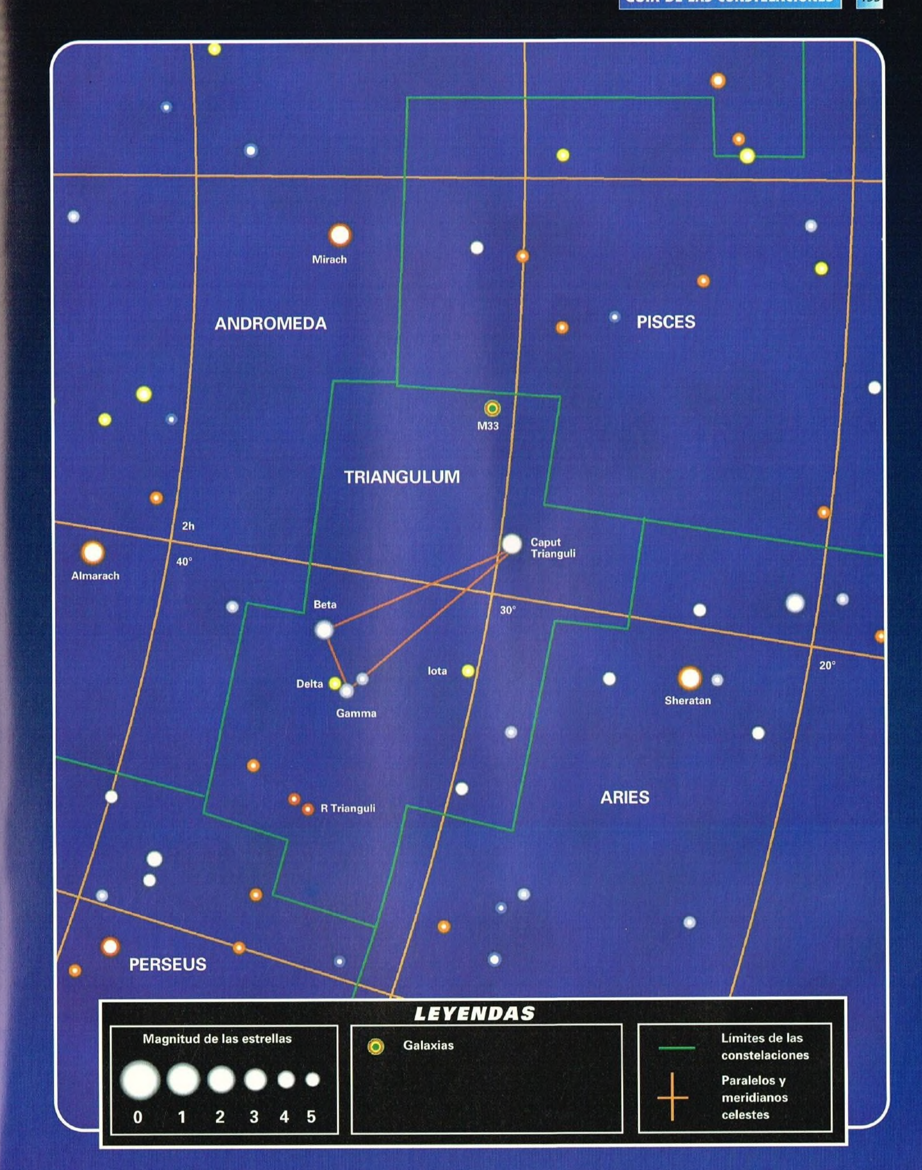


El Triángulo es una constelación que desde la Antigüedad ha sido identificada con la figura geométrica cuyo número de lados es símbolo de perfección.

DÓNDE BUSCARLA

EL TRIÁNGULO

La constelación del Triángulo abarca una región del cielo comprendida entre 25° N y 37° N de declinación, y entre 1 hora 30 minutos y 2 horas 50 minutos de ascensión recta.
Esta constelación es íntegramente visible todo el año desde latitudes situadas más al norte que 65° N y parte del año desde las regiones comprendidas entre 65° N y 53° S. Por debajo de esta última latitud nunca es íntegramente visible.


Mirach
ANDROMEDA
PISCES
M33
TRIANGULUM
2h
Caput Trianguli
40°
Almarach
Beta
30°
Iota
20°
Delta
Gamma
Sheratan
ARIES
R Trianguli
PERSEUS
LEYENDAS
Magnitud de las estrellas
0 1 2 3 4 5
Galaxias
Límites de las constelaciones
Paralelos y meridianos celestes

LAS PARADOJAS DE LA LUZ

La teoría de la relatividad restringida, desarrollada por Albert Einstein a comienzos de siglo, lleva a conclusiones sorprendentes. Velocidades que no se suman, longitudes que se acortan, tiempos que se dilatan. Todas estas aparentes paradojas tienen que ver con un fenómeno físico fundamental: la luz.

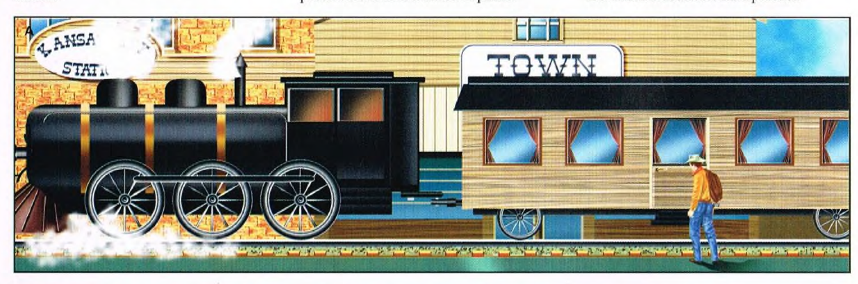


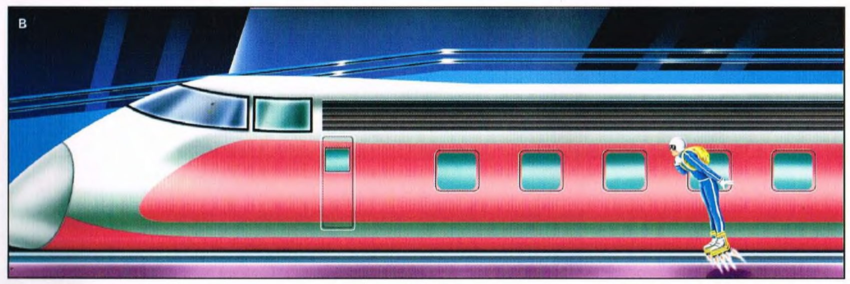
La luz es el medio a través del cual los astrónomos pueden explorar el universo. A través de ella llegan hasta nosotros las informaciones relativas al color, la temperatura, la composición química y todos los demás parámetros característicos de una estrella o una galaxia. Además, la luz, tal como se entiende el concepto en el lenguaje corriente (la luz del Sol o de una lámpara), representa una pequeñísima porción del espectro electromagnético, el cual comprende todas las ondas que van de las radioondas a los rayos X y gamma. Todas estas ondas pueden analizarse con los modernos métodos de investigación, que suministran una vastísima colección de resultados.

Abajo, si el hombre del dibujo A subiera al tren y caminase por él, su velocidad respecto al suelo sería la suma de la velocidad del tren y de la suya propia. En el caso del tren del dibujo B, que viaja a la velocidad de la luz, las velocidades no se sumarían de la misma manera.

LOS PRINCIPIOS DE LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD RESTRINGIDA

En 1905, Albert Einstein publicó sus primeros escritos sobre la teoría de la relatividad restringida, basada en dos postulados fundamentales. El primer postulado sostiene que la velocidad de la luz en el vacío es fija, independiente del movimiento del observador que la estudia y de la fuente que la emite. Esta velocidad, que es la máxima alcanzable en la naturaleza, vale unos 300.000 km/s (exactamente 299.792,458 km/s) y se indica convencionalmente con la letra *c*. El segundo postulado expresa sustancialmente que las leyes de la física son las mismas en todos los sistemas de referencia que se mueven rectilínea y uniformemente los unos respecto a los otros. Esto implica que no existe ningún sistema de referencia absoluto respecto al cual medir la velocidad y que no existen ni el reposo ni el movimiento absoluto. En la práctica







Arriba, viajar en un jet produce una dilatación del tiempo que ha podido medirse.

no es posible determinar, con un simple experimento, cuál, de dos cuerpos en movimiento el uno con respecto al otro, está en movimiento y cuál en reposo. El principio de la relatividad, en su forma más simple, es verificable en la vida de cada día; si partimos de una estación, con otro tren al lado, no es muy fácil determinar si los que nos movemos somos nosotros o el otro tren.

300 MÁS 30 NO SON 330

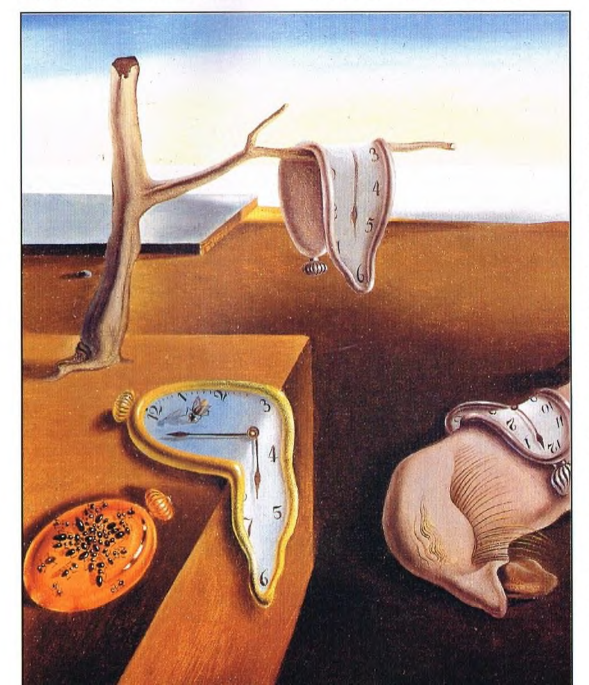
La primera consecuencia sorprendente de la relatividad einsteniana es que, cuando las velocidades son próximas a la de la luz, éstas no se suman de manera normal.

Utilicemos una vez más el ejemplo del tren y consideremos una persona que camina por un vagón. Supongamos que el tren corre a 70 km/h y que la persona camina a 5 km/h; la persona, con respecto al suelo, tendrá una velocidad de 75 km/h, igual a la suma de su velocidad y de la del tren. Si caminase hacia la cola, su velocidad respecto a la Tierra sería de 65 km/h porque su desplazamiento sería contrario al del medio en el cual se encuentra.

Supongamos ahora que nuestro observador se encuentra en un tren muy especial que viaja a la velocidad de la luz (300.000 km/s) y supongamos que él vaya provisto de unos cohetes que le permiten moverse por los vagones a 30.000 km/s. Según el sentido común, su velocidad respecto al suelo sería de 330.000 km/s. Pero esto no podría suceder, porque entraría en contradicción con el primer postulado de la relatividad y, en efecto, es posible experimentar, que no sucede en la realidad que nos rodea. La naturaleza es de tal modo que un cuerpo no puede acelerarse a una velocidad mayor que *c*, sea cual sea la energía que se le transmite.

TRANSFORMACIONES DE GALILEO Y DE LORENTZ

Según las llamadas transformaciones de Galileo, la velocidad del tren V_T y del observador V_0 se suman de acuerdo con la relación simple:
$V_S = V_T + V_0$
donde V_S es la velocidad del observador respecto al suelo.
En el caso de velocidades próximas a la de la luz, estas relaciones dejan de ser válidas y deben sustituirse por otras, mucho más complejas, sugeridas por H.A. Lorentz y retomadas por A. Einstein, en las que aparece el término
$1 - v^2/c^2$
característico de todas las ecuaciones de la relatividad restringida, donde *v* es la velocidad del cuerpo considerado y *c* la velocidad de la luz. El cociente v^2/c^2 es evidentemente despreciable cuando *v* es mucho menor que *c*, como sucede con los objetos de la vida cotidiana, pero se vuelve significativo cuando las velocidades en juego son próximas a la de la luz.



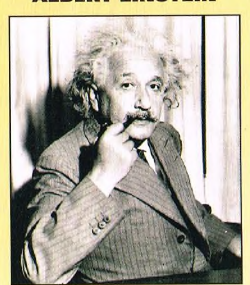
LOS SUCESOS DEJAN DE SER SIMULTÁNEOS

Otra consecuencia de la relatividad restringida es que el concepto de simultaneidad de dos sucesos pierde significado. Un rayo que caiga en un lugar situado a mitad de camino de dos observadores en reposo es visto por ellos en el mismo momento, pero si una de

A la izquierda, una peculiar interpretación del transcurso del tiempo según Salvador Dalí, en uno de sus cuadros más célebres,* Persistencia de la memoria*, de 1931.

PERSONAJES

ALBERT EINSTEIN



1879 - 1955

Nacido en Alemania, pero ciudadano suizo desde 1900, Albert Einstein está considerado como el físico más grande de este siglo. Sus ideas y descubrimientos, que partían de consideraciones muy simples sobre la vida cotidiana, revolucionaron la física moderna. Einstein publicó su teoría de la relatividad restringida en 1905 y su teoría de la relatividad general en 1916. Estas teorías modificaron radicalmente, después de 300 años, la concepción newtoniana del mundo físico, mostrando que las ecuaciones de Newton son en realidad un caso particular de unas relaciones mucho más complejas dotadas de una validez más general. La obra de Einstein no se limitó a la física fundamental, sino que también influyó en gran medida en la astrofísica y la cosmología, pues explicó fenómenos como la precesión del perihelio de Mercurio y la deflexión de los rayos de luz cuando pasan cerca de objetos de gran masa. Einstein recibió el premio Nobel de física de 1921. Murió en Princeton, en Estados Unidos, donde se había refugiado durante la segunda guerra mundial.

las personas está en movimiento a una velocidad próxima a la de la luz, las cosas cambian y el rayo deja de ser visto simultáneamente por ambos. En relatividad, por tanto, no tiene sentido decir que un suceso está ocurriendo «ahora» si no se precisa respecto a qué sistema de referencia se realiza la observación. El tiempo, por tanto, es similar a las tres dimensiones espaciales y constituye la cuarta dimensión del mundo físico. El espacio-tiempo, es, por esta razón, cuatridimensional.

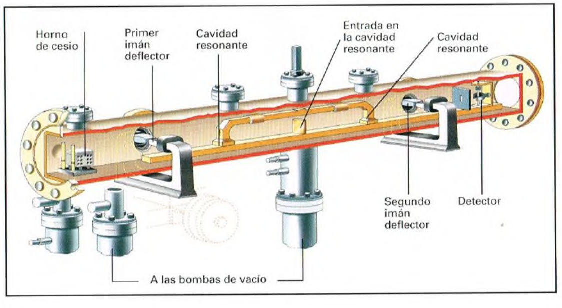


Una galaxia lejana, cuya luz emplea decenas de millones de años en llegar hasta nosotros.

DILATACIÓN DEL TIEMPO

Existen paradojas todavía más increíbles, la más famosa de las cuales es la llamada paradoja de los gemelos. Consideremos a dos gemelos A y B en la Tierra que, en el momento del inicio del experimento, tienen 20 años y poseen ambos un reloj y un calendario. Supongamos ahora que uno de los gemelos, A, se va de paseo al espacio durante un tiempo a bordo de una astronave que viaja a una velocidad próxima a la de la luz. En la astronave, A ve transcurrir normalmente el tiempo en su propio reloj y de igual manera ve pasar los días en su calendario. Cuando vuelve a la Tierra, sin embargo, le espera una sorpresa: ¡su gemelo, B, es mucho más viejo que él! La diferencia de edad depende de la duración del viaje

Abajo, esquema de un reloj atómico. Se ha utilizado un instrumento de este tipo para medir la dilatación del tiempo, que se produce también a bajas velocidades.





Arriba, zona central del cúmulo de galaxias de Virgo, cuya luz emplea unos 50 millones de años en llegar a la Tierra.

y de la velocidad a la cual ha tenido lugar. Cuanto más próxima a la de la luz haya sido la velocidad de la astronave, mayor será la diferencia de tiempo experimentada por los gemelos; podría ocurrir incluso que B hubiera muerto hace tiempo y que A se encontrase en lo que podríamos calificar como su «futuro».

La paradoja descrita ha sido comprobada científicamente. Naturalmente, no es posible construir astronaves que viajen a la velocidad de la luz, pero a comienzos de los años setenta se realizó un experimento que permitió medir la dilatación del tiempo. Se sincronizaron dos relojes atómicos muy precisos; uno de los dos fue colocado a bordo de un velocísimo avión a reacción y el otro permaneció en tierra. Al regreso del vuelo, el reloj viajero retardaba respecto al de tierra. Naturalmente, el retraso era mínimo (una fracción pequeñísima de segundo) porque la velocidad de un avión es mucho menor que la de la luz. Pero lo importante es que se pudo medir.

UN «RITMO» DISTINTO

El tiempo, por tanto, transcurre de modo distinto en los diferentes sistemas de referencia. Este hecho, realmente sorprendente, constituye uno de los resultados más importantes de la física einsteniana. Es interesante subrayar que, en el ejemplo de los gemelos, ninguno de ellos se da cuenta de nada; el gemelo A no ve que su reloj corre más lentamente de lo que él está acostumbrado. Es el ritmo del paso del tiempo el que es distinto, pero sólo si se compara con el de otro sistema de referencia. Si A decidiese no regresar nunca a la Tierra no se daría cuenta de que su tiempo ha transcurrido de modo distinto. El argumento podría invertirse. En un sistema solidario con el gemelo A, sería B quien estaría en movimiento y experimentaría un transcurrir más lento del tiempo.

CONTRACCIÓN DE LAS LONGITUDES

Análogamente al tiempo, también el espacio es influido por el movimiento. Una regla que para un observador en reposo mide 20 cm es más corta para un observador en movimiento rápido; una vez más la entidad del efecto depende de lo próxima que está la velocidad en cuestión a la velocidad de la luz.

Estos extraños fenómenos parecen bastante alejados de la vida cotidiana y en muchos sentidos lo están. Sin embargo, del espacio nos llegan pruebas directas de los efectos relativistas: algunas partículas de los rayos cósmicos, que es posible detectar en la superficie terrestre, llegan hasta nosotros porque, al moverse a altísima velocidad, su vida se dilata como consecuencia del transcurrir más lento del tiempo.

SONDAS VENERA A VENUS

El lucero del alba es seguramente el planeta que más han visitado las sondas terrestres. Su tamaño y sus características geológicas lo asemejan mucho a la Tierra. Por ello, su exploración ha sido muy precisa y detallada, tanto por parte rusa como por parte estadounidense. Pero el récord de sondas enviadas a Venus corresponde indudablemente a los soviéticos.



Son las 8 horas y 13 minutos del 22 de octubre de 1975 (hora de Moscú). En el suelo venusiano se acaba de posar el módulo de aterrizaje de la sonda soviética Venera 9. A los pocos minutos llega a la Tierra la primera fotografía del misterioso suelo del planeta gemelo del nuestro. Esta misión corona toda una serie de tentativas de la Unión Soviética para llevar un medio terrestre a aquella superficie, unas tentativas que se iniciaron casi 15 años antes. Hay que remontarse al 12 de febrero de 1961 para ver cómo la primera Venera dejaba la Tierra en busca del segundo planeta del sistema solar.

Esta primera sonda pesaba 643 kg y tenía una altura de 2 m. Su misión consistía en estudiar el espacio cósmico que atravesaba y en detectar eventuales campos magnéticos alrededor de Venus. Pero la sonda nunca logró centrarse en su objetivo; cuando se encontraba todavía a unos 23 millones de km de la Tierra las comunicaciones se interrumpieron y la sonda prosiguió silenciosamente su camino sin transmitir a la Tierra ninguna información. Los técnicos constataron además que la sonda pasó entre el 19 y el 20 de mayo del mismo año a unos 100.000 km de distancia de Venus.

EL INGRESO EN LA ATMÓSFERA DEL PLANETA

También las Venera 2 y Venera 3, lanzadas casi simultáneamente en 1965, fracasaron en su cometido porque las comunicaciones se interrumpieron antes de que llegara el momento más importante de la misión.

Las principales características químicas de la atmósfera del planeta fueron detectadas por primera vez por la Venera 4, que fue lanzada el 12 de junio de 1967. Esta sonda logró penetrar en la densa atmósfera de Venus y a unos 27 km de la superficie determinó sus principales parámetros, transmitiéndolos a la Tierra. A aquella altura, sin embargo, la sonda dejó de transmitir. Dos años después, en 1969, otras dos sondas Venera, la 5 y la 6, siguieron el camino de las precedentes y lograron entrar en la atmósfera de Venus y transmitir a los científicos informaciones hasta 25 km de la superficie la primera y hasta 10 la segunda.

Para obtener un pleno éxito, todavía era necesario superar los problemas de las elevadas temperaturas y presiones existentes cerca de la superficie. Esta meta se logró el

En el dibujo se representa el esquema de una sonda Venera.

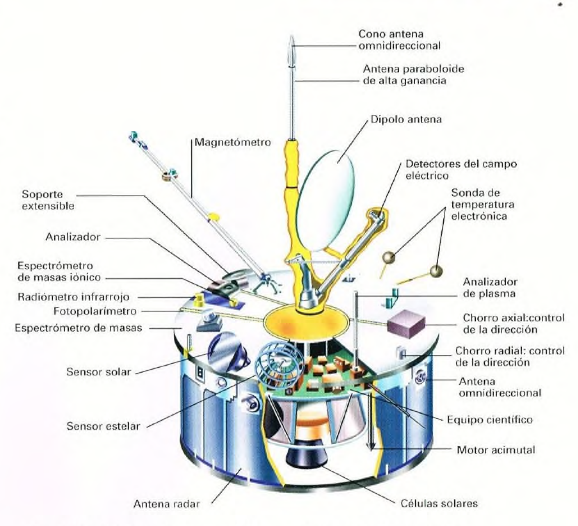
Antena helicoidal para comunicaciones entre los módulos orbital y de descenso
Protección eyectable de la ventana del telefotómetro
Contenedor de protección para el módulo de descenso durante la penetración en la atmósfera venusiana
Soporte circular para los instrumentos de investigación y experimentación
Antena de baja ganancia
Radiador del sistema de control
Depósito de carburante para los motores cohete de corrección de ruta
Compartimiento instrumental
Contenedor de los paracaídas del módulo de descenso
Instrumentos científicos para el estudio de la atmósfera venusiana
Freno aerodinámico circular
Cinturón metálico de unión entre los módulos orbital y de descenso
Instalación para la disipación térmica
Patas de soporte
Anillo amortiguador
Paneles solares
Antena parabólica de alta ganancia
Sensor estelar
Sensor solar

15 de diciembre de 1970, cuando la sonda Venera 7 logró posarse en la superficie venusiana y transmitir a la Tierra informaciones durante unos 23 minutos.

La Venera 7 se construyó con materiales capaces de resistir una presión de 180 kg/cm² y una temperatura de 540 °C durante más de una hora. El éxito de la empresa permitió a los científicos descubrir que en el suelo de Venus había una presión de unas 90 atmósferas y una temperatura de 475 °C.

Este éxito fue seguido por el de la Venera 8, que transmitió datos desde la superficie durante unos 50 minutos.

En aquel punto, los soviéticos comenzaron a construir sondas a Venus mucho más grandes que las anteriores, pues se dieron cuenta de que explorando los planetas con sondas robotizadas hubieran podido tomarse la revancha sobre los estadounidenses, que fueron los primeros en conquistar la Luna.



Arriba, dibujo de una sección de la sonda Pioneer-Venus.

VENERA 9 Y VENERA 10

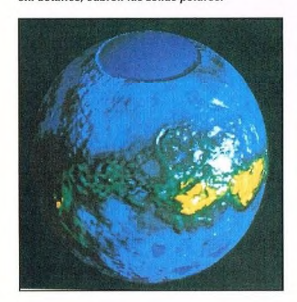
La Venera 9 partió el 8 de junio de 1975 y pesaba 4.936 kg, de los cuales 1.560 correspondían al módulo que debía descender hasta la superficie del planeta. Como de costumbre, a la sonda le siguió otra gemela, que pesaba 5.033 kilogramos.

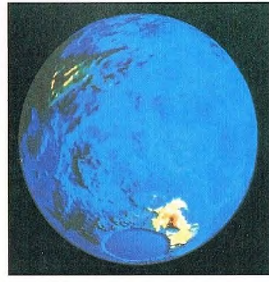
Después de 136 días de viaje y un recorrido de unos 300 millones de km, el 20 de octubre de 1975 la sonda Venera 9 se presentó en las cercanías del planeta. Faltaban dos días para su ingreso en la atmósfera de Venus y la sonda se dividió en dos partes: una destinada a permanecer en órbita y la otra a descender a la superficie.

El módulo orbital se colocó en una órbita circumvenusiana con un perigeo de 1.500 km y un período de revolución de unos 2 días. Mientras tanto, el módulo de descenso proseguía su viaje y, a las 6 horas y 58 minutos (hora de Moscú) del 22 de octubre, penetraba en la atmósfera del planeta a la velocidad de 10,7 km/s.

La atmósfera redujo la velocidad del vehículo a 250 m/s (900 km/h) y se abrieron los paracaídas; a 50 km del suelo, éstos se separaron y el vehículo descendió por medio de un sistema de frenos aerodinámicos: a las 8 horas y 13 minutos (hora de Moscú) se posaba en la superficie de Venus. Durante el descenso y ya en el suelo, la sonda siguió transmitiendo datos durante 53 minutos.

Abajo, topografía de Venus en colores convencionales. El azul claro representa zonas de nivel medio y el azul oscuro zonas menos elevadas; el amarillo, el verde y el rojo corresponden a elevaciones cada vez mayores. La imagen de abajo muestra el polo Norte y la de la derecha el polo Sur. Los dos círculos, sin detalles, cubren las zonas polares.





Hasta el aterrizaje de estas dos últimas sondas, los científicos creían que la superficie de Venus estaba continuamente en penumbra y se dudaba incluso de que ningún instrumento óptico pudiera suministrar informaciones sobre la forma y la composición del suelo.

IMÁGENES DE LA SUPERFICIE

En las fotos enviadas a la Tierra por las Venera 9 y 10 la línea del horizonte aparecía curvada y era difícil evaluar su distancia al objetivo. No obstante, los resultados fueron mucho mejores de lo esperado. El vuelo de la Venera 10 sólo se diferenció del de la Venera 9 por el tiempo y el lugar del aterrizaje: la sonda descendió a la superficie de Venus el 25 de octubre a las 8 horas y 17 minutos a una distancia de 2.200 km del punto de aterrizaje de la Venera 9.

La infatigable exploración venusiana de los soviéticos siguió realizando progresos con las Venera 11 y 12, que partieron en 1978. Las Venera soltaron sendos módulos a la superficie del planeta y las naves madre prosiguieron su viaje colocándose en una órbita heliocéntrica. Los dos módulos aterrizaron en diciembre y transmitieron a la Tierra numerosos datos, aunque no imágenes.

Las sondas Venera 13 y 14 fueron lanzadas, respectivamente, el 30 de octubre y el 4 de noviembre de 1981. También en este caso los vehículos madre fueron colocados en una órbita en torno al Sol, mientras que los respectivos módulos de descenso aterrizaban, como estaba previsto, el 1 y el 5 de marzo de 1982 a unos 1.000 km de distancia el uno del otro. El módulo de la Venera 13 transmitió durante 127 minutos y el de la Venera 14 durante 57 minutos.

Ambos módulos enviaron por primera vez a la Tierra imágenes en color que revelaron un paisaje venusiano anaranjado con tendencia al marrón. Estas imágenes permitieron, mucho más que las anteriores, hacerse una idea de la composición química del suelo del planeta.

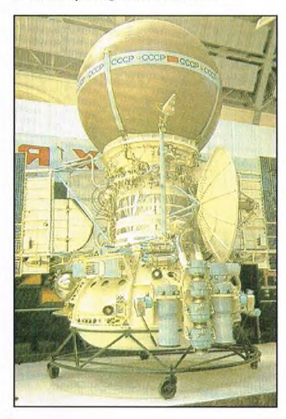
LAS ÚLTIMAS SONDAS VENERA Y LA VEGA VENERA/HALLEY

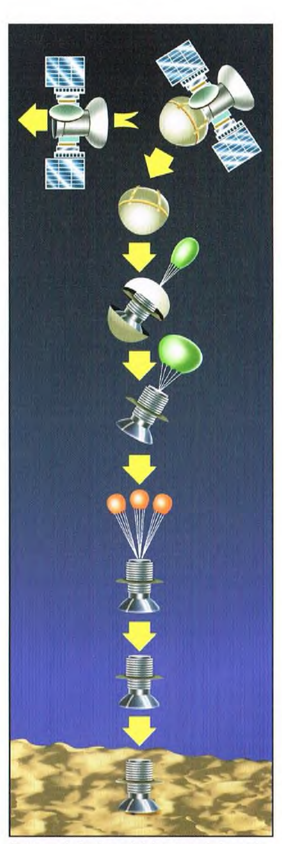
Un ulterior e importante paso adelante fue dado por las dos sondas sucesivas, Venera 15 y 16, que partieron respectivamente el 2 y el 7 de junio de 1983 y entraron en órbita alrededor del planeta el 10 y el 14 de octubre de 1983. Con un radar de apertura sintética SAR iniciaron un trabajo de cartografía del planeta con una resolución de 1-2 km. El radar, que tenía una apertura de casi 8,5 m, hacía las veces del módulo de descenso, que en estas misiones no existió.

En diciembre de 1984 partió la más espectacular de las misiones soviéticas a Venus, la Vega Venera/Halley, en la cual colaboró también Francia. Dos sondas transportaron al planeta los módulos de descenso y un globo de 3,5 m de diámetro que, moviéndose al compás de las corrientes de la atmósfera venusiana, debía determinar sus características dinámicas.

Los globos se movieron por el aire del planeta durante unos 11.000 km a una altitud de 50 km. Las sondas madre, en cambio, prosiguieron su camino hacia el cometa Halley. Vega 1 pasó a través de la cola del cometa el 6 de marzo de 1986 a unos 10.000 km del núcleo y Vega 2 sobrevoló el núcleo a 3.000 km de altitud el 9 de marzo del mismo año.

Abajo, modelo en tamaño real de la sonda Venera 11, que llegó a Venus en 1978.



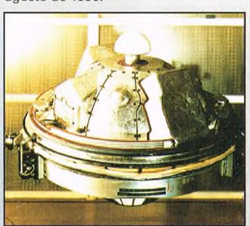


Esquema de las fases del descenso de la sonda Venera 9 sobre la superficie de Venus.

¿Y ESTADOS UNIDOS?

La conquista científica de Venus también era ambicionada por los estadounidenses, quienes ya en agosto de 1962 habían logrado hacer pasar la sonda Mariner 2 a 34.500 km de la superficie del planeta. El 19 de octubre de 1967, enviaron la sonda Mariner 5, que efectuó un vuelo próximo del planeta a una distancia no superior a los 3.900 km. En 1973, la Mariner 10 se encontró con Venus a lo largo de su trayectoria hacia Mercurio. Pero el programa más completo para estudiar Venus lo llevaron a cabo dos sondas que partieron en 1978: la Pioneer 12, llamada también Pioneer-Venus 1, y la Pioneer 13 o Pioneer-Venus 2.

La primera entró en órbita alrededor del planeta el 4 de diciembre de 1978 y durante ocho meses estudió la interacción del viento solar y la atmósfera del planeta; además, cartografió con un radar la superficie, invisible para los más potentes telescopios a causa de la densa atmósfera del planeta. Se lograron así mapas topográficos de una precisión media de cien metros. Pioneer-Venus 1 detectó también una intensa actividad volcánica en el planeta. Pioneer-Venus 2, en cambio, llevó consigo tres minisondas que se separaron de la nave madre el 20 de noviembre de 1978 y se dirigieron hacia distintos lugares de la superficie de Venus. Al entrar en la atmósfera, enviaron a la Tierra datos sobre la circulación atmosférica, sobre su composición, sobre los vientos, así como sobre las temperaturas y las presiones a distintas alturas. La sondas debían haberse destruido al entrar en contacto con el suelo pero una de ellas resistió y transmitió informaciones desde la superficie durante unos 67 minutos. De todos modos, el mapa más detallado de la superficie venusiana fue realizado por los estadounidenses con la sonda Magellan, que llegó a Venus el 10 de agosto de 1990.



Arriba, una de las tres pequeñas sondas de la misión Pioneer-Venus 2.



EN EL PRÓXIMO NÚMERO

EL SISTEMA SOLAR

LAS OCULTACIONES

ESTRELLAS Y GALAXIAS

MEDIDA DE LAS DISTANCIAS EN LA VÍA LÁCTEA

GUÍA DE LAS CONSTELACIONES

ARIES

LA EXPLORACIÓN DEL ESPACIO

HIPPARCOS

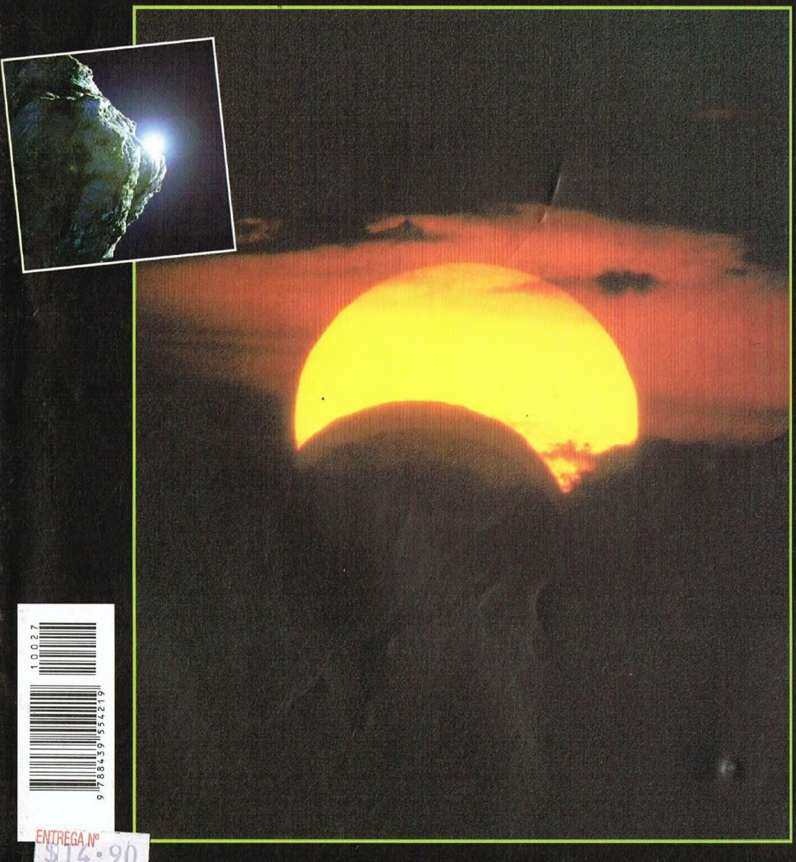
EL USO DEL ESPACIO

EL TETHERED SATELLITE SYSTEM (TSS)

EL UNIVERSO

ENCICLOPEDIA DE LA ASTRONOMÍA Y EL ESPACIO

27



PLANETA DeAGOSTINI



COMPOSICIÓN DE LA OBRA

Volumen 1	Fascículos 1	al	16
Volumen 2	Fascículos 17	al	32
Volumen 3	Fascículos 33	al	48
Volumen 4	Fascículos 49	al	64
Volumen 5	Fascículos 65	al	80

VENTA EN QUIOSCOS

Pida a su proveedor habitual que le reserve un ejemplar de EL UNIVERSO. Adquiriéndolo todas las semanas en el mismo punto de venta facilitará la distribución y obtendrá un mejor servicio.
Las tapas correspondientes a cada volumen se ponen a la venta con el fascículo que cierra el tomo. Con dicho fascículo se entregan las portadillas correspondientes.

Presidente: José Manuel Lara
Director General: Carlos Fernández
Director Editorial: Virgilio Ortega
Director General de Producción: Félix García
Coordinador General: Carles Dorico

© Editorial Planeta Argentina S.A.I.C.
Av. Independencia, 1668 - Capital Federal
Servicio de atención al cliente: Tel. (01) 482 - 0655 y 482 - 0657
Distribuye: Capital: Huesca-Sanabria,
Baigorri, 103, Capital Federal,
Interior: D.G.P., Alvarado, 2118, Capital Federal

© Editorial Planeta Mexicana, S.A. de C.V.
Av. Insurgentes Sur # 1162 - México D.F.
Servicio de atención al cliente: Tel. 575 13 48

© Editorial Planeta Colombiana, S.A.
Carrera, 68, n.º 25-55 - Santa Fé de Bogotá, D.C.
Servicio de atención al cliente: Tel. 9800 - 15315

© Editorial Planeta Chilena, S.A.I.C.
Olivares, 1229 - Santiago de Chile

ISBN Obra completa (con vídeo): 84-395-4148-1
Obra completa (sin vídeo): 84-395-4138-4
Fascículos (con vídeo): 84-395-4149-X
Fascículos (sin vídeo): 84-395-4139-2
Depósito legal: B-47.097-1997

Impresión: Cayfosa, Santa Perpètua de Mogoda, Barcelona
Impreso en España - Printed in Spain - Mayo 1998

Los editores se reservan el derecho de modificar el precio de venta de los componentes de la colección en el transcurso de la misma, si las circunstancias así lo exigieran.
Los editores garantizan la publicación de todos los fascículos que componen esta obra.

Fotografías: Lee Gibbons: cubierta, 116-117, 116ab., 117ar.; ESA/SPL: 107c.der.; E.T. Archive: 106ar.; Galaxy Picture Library: 101, 104, tercera de cubiertas; IGDA: 107ar.der.; Science Photo Library/Julian Baum: 106-107; Dr. Jeremy Burgess: 103 der.; Range: 111; Hugh Rowland: 110; Spectrum: 110, 111; US Naval Observatory: 112ar.izq.; Bristock-IFA: 114-115; BNSC/ESA: 118ab.; ESA: 118-119, 119ab., 120c.; Tony Stone Picture Library: 120ab.
Dibujos: Robin Carter/WLAA: 104-105, 117ab.; David A. Hardy: 102-103; Hugh Rowland: 105, 106ab., 120; Katz: 108-109; Sandra Russell/Black Hat: 112ar.; Julian Baum: 113; Farroxs: 116ar.; Robin Bottel: 115ab.; Spectrum Picture Library: 114ab.

LAS OCULTACIONES

El curioso fenómeno que tiene lugar cuando dos astros pasan uno por delante de otro, además de ser espectacular, permite a los estudiosos obtener gran cantidad de informaciones sobre los dos cuerpos que participan en la ocultación.



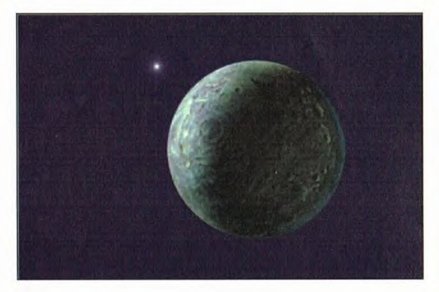


Observemos durante toda una noche la bóveda celeste: nos parecerá que se mueve regularmente como un todo alrededor de la estrella Polar. Veremos que las constelaciones no cambian de forma mientras hacen su recorrido celeste, un recorrido que las lleva a efectuar, en 24 horas, una vuelta completa alrededor del polo celeste. Sin embargo, si en el firmamento es posible observar la Luna, veremos que en su camino de este a oeste parece moverse a una velocidad menor respecto a las estrellas. Esto significa que nuestro satélite parece moverse de oeste a este respecto a los otros astros. En efecto, la Luna tiene dos movimientos: el aparente (de este a oeste, debido a la rotación terrestre) y el propio (de oeste a este, debido a su órbita alrededor de la Tierra). La prueba de esto la obtendremos la noche siguiente comprobando que la Luna ocupa una posición muy distinta a la de la noche anterior, y que hay que esperar aproximadamente una hora más para verla salir. Si continuamos las observaciones en las semanas y en los meses siguientes, nos daremos cuenta de que existen también otros astros que se mueven en el firmamento respecto a las estrellas: son los planetas. Por consiguiente, hay una categoría de cuerpos celestes que se mueve respecto a las llamadas estrellas fijas. Puede ocurrir que, durante el movimiento, uno de estos cuerpos móviles pase por delante de las estrellas que están en el fondo. En realidad, sabemos que, mientras que la Luna y los planetas distan de nosotros como máximo algunos miles de millones de kilómetros, las estrellas se hallan a distancias superiores al año luz. Cuando un objeto celeste pasa exactamente por delante de otro, se habla de ocultación, porque nos impide su visión. Por tanto, las ocultaciones no son más que eclipses en los que el objeto eclipsado suele ser una estrella, aunque también podría ser un planeta. Naturalmente, la ocultación más espectacular es la que tiene lugar cuando el disco lunar oculta el solar, provocando un eclipse de Sol.

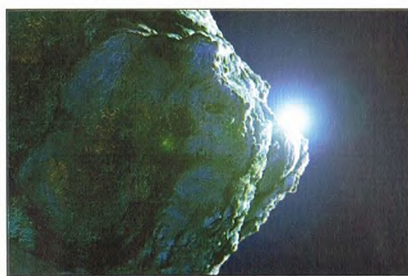
LOS JUEGOS DE LA LUNA

Por sus grandes dimensiones aparentes (el disco lunar tiene un diámetro aparente de medio grado), nuestro satélite es el objeto celeste que ofrece mayor número de ocultaciones. Son particularmente espectaculares las que tienen lugar con estrellas brillantes o con los otros planetas. Las órbitas de la Luna y de los planetas se hallan sobre planos poco inclinados respecto a la eclíptica. Por tanto, en el firmamento, están situadas en posiciones bastante parecidas, lo que permite a la Luna pasar alguna vez por delante de un planeta y ocultarlo. Además, en las proximidades de la eclíptica hay algunas estrellas brillantes: en primer lugar, Régulo, en la constelación de Leo, y *Spica*, en la constelación de Virgo. Además de ser espectaculares, las ocultaciones de estrellas por la Luna pueden proporcionar informaciones sobre la órbita y la configuración de nuestro satélite natural. Si disponemos de observatorios dispuestos adecuadamente y medimos desde ellos los instantes exactos en los que la estrella desaparece y reaparece detrás del borde

En la imagen, paso de la estrella 28 Sgr por detrás de los anillos y el disco de Saturno. La imagen, obtenida con el telescopio de 60 pulgadas de Monte Wilson, muestra a 28 Sgr (en el círculo) detrás de la división de Cassini.



Arriba, la Luna se desplaza en el cielo respecto a las estrellas fijas, como es fácil constatar observando su posición una noche tras otra. En su movimiento, puede pasar por delante de una estrella, ocultándola.



Arriba, el sistema solar comprende numerosos asteroides, cuyas órbitas se conocen con poca precisión a causa de las perturbaciones gravitatorias producidas por los grandes planetas, especialmente Júpiter. Pero como la posición de las estrellas en el firmamento se sabe con gran exactitud, si un asteroide oculta una estrella, es posible disponer de una medida muy precisa de su posición y, por tanto, conocer mejor sus parámetros orbitales.

lunar, pueden reconstruirse los perfiles de los relieves que hay en la superficie de la Luna cerca del borde. Por otra parte, como la posición de las estrellas se conoce con una gran precisión, la ocultación de una de ellas permite efectuar medidas muy exactas de la posición de la Luna y, por tanto, conocer su movimiento orbital de una manera muy detallada. En realidad, este movimiento viene determinado no sólo por la presencia de la Tierra, que para nuestro satélite natural representa el objeto que más influye en su movimiento en el espacio, sino también por la del Sol y de los otros planetas, los cuales, a pesar de estar muy alejados de la Tierra, atraen a la Luna y, con ello, complican su órbita. Además, la forma no perfectamente esférica de la Tierra y de la Luna, así como la proximidad relativa entre ambos cuerpos, hacen el problema todavía más complejo. Hoy sabemos que la Luna se está alejando muy lentamente de la Tierra, mientras los períodos de rotación de ambos cuerpos van aumentando poco a poco. Estos dos fenómenos están relacionados entre sí, pero lo más importante de ellos es que complican la órbita lunar. Hay también una segunda medida que es posible gracias a una ocultación estelar por parte de la Luna: siguiendo atentamente –por ejemplo, con un fotómetro– el modo en que la luz de la estrella ocultada disminuye a medida que desaparece tras el disco lunar, puede saberse si la estrella tiene una compañera muy próxima, es decir, si es doble. Con este sistema se ha pensado medir también los diámetros de estrellas gigantes. La dificultad radica en que, generalmente, estas estrellas se hallan a grandes distancias, lo que hace que su diámetro aparente sea muy pequeño, demasiado para poder evaluarse con este método. No obstante, las ocultaciones de objetos de apariencia estelar han permitido, como veremos, descubrimientos muy importantes.

LAS OCULTACIONES ASTEROIDALES

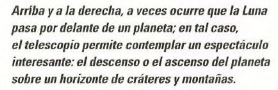
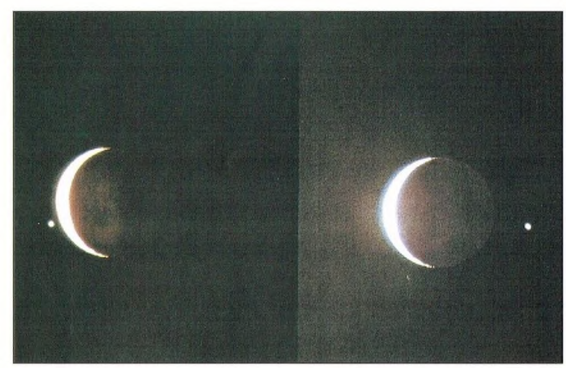
Para determinar los parámetros orbitales de los asteroides, pueden aprovecharse los casos en los que tales objetos ocultan una estrella. Así puede darse una medida muy precisa de la posición del pequeño planeta, evaluando el instante en que desaparece la estrella. Sin embargo, dado que la órbita sólo se conoce de modo aproximado, hay que observar la estrella ocultada durante unos minutos, porque, *a priori*, no se sabe exactamente cuándo ocurrirá el fenómeno. Además, la incertidumbre sobre las órbitas asteroidales es tal que la mayoría de las veces sólo puede indicarse aproximadamente la zona donde será visible la ocultación. Únicamente *a posteriori* puede reconstruirse exactamente el recorrido del asteroide en la parte de bóveda celeste que se controla. Este tipo de observaciones se hace gracias a la pasión de los aficionados, que disponen de pequeños mapas en los que está indicado el recorrido que se prevé para el objeto eclipsante, además de otros datos sobre el tiempo previsto para la ocultación y la disminución de luminosidad estimada para la estrella. Otros mapas muestran el recorrido de la sombra del asteroide sobre la superficie terrestre e indican las zonas desde las que se puede observar la ocultación.

LA IDENTIFICACIÓN DE 3C 273

Con una ocultación lunar se ha conseguido localizar con precisión el primer cuásar descubierto. El tercer catálogo de radiofuentes de Cambridge incluía diversos objetos, pero, dada la poca resolución espacial de los aparatos, no era posible situar exactamente estos objetos en la bóveda celeste. Por esto, era difícil asociarles eventuales contrapartidas ópticas, es decir, objetos luminosos que permitieran efectuar estudios más profundos. Pero un día se pensó que la Luna debía desplazarse por la región celeste en la que estaba localizada



A la izquierda, la estrella Alfa de Centauro. A menudo, las estrellas forman sistemas binarios en los que ambas componentes orbitan una junto a la otra. Pero, si las dos están muy alejadas de la Tierra, se nos aparecen como una estrella única, cuya doble naturaleza puede sernos revelada por la Luna cuando oculta los dos astros en tiempos algo diferentes. Esto permite descubrir la verdadera estructura del sistema.

Arriba y a la derecha, a veces ocurre que la Luna pasa por delante de un planeta; en tal caso, el telescopio permite contemplar un espectáculo interesante: el descenso o el ascenso del planeta sobre un horizonte de cráteres y montañas.

la fuente número 273. Entonces, dado que el movimiento de nuestro satélite en el firmamento es bien conocido, midiendo con precisión el momento en que la radiofuente desaparecía detrás del disco lunar, se logró descubrir que esta fuente estaba asociada a una pequeña estrella azul de magnitud 13, situada en la constelación de Virgo. Estudios posteriores de este pequeño astro, y sobre todo del espectro de la luz que emite, permitieron comprender que se trata, en realidad, de una galaxia lejanísima que emite una gran cantidad de radiación, muy superior a la de una galaxia normal. Un estudio detenido del modo en que las ondas de radio emitidas por 3C 273 se extinguían a medida que esta fuente desaparecía tras el borde lunar permitió comprobar que tal fuente no es puntiforme, sino extensa, formada por diversas partes próximas entre sí y que la mayor cantidad de radiación proviene sólo de una de ellas.

LA PRIMERA ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LA LUZ

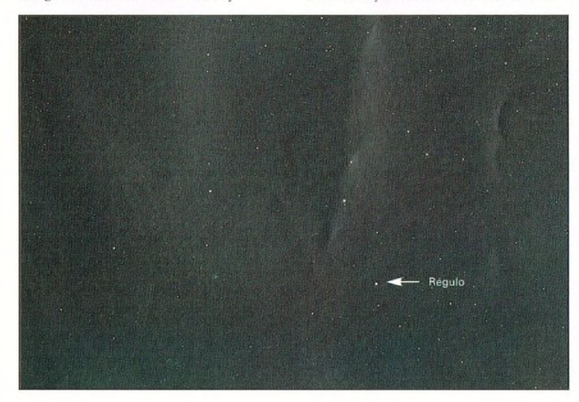
Las ocultaciones tuvieron un papel bastante curioso en la historia de la ciencia cuando se quiso hacer la primera medición de la velocidad de la luz. La primera estimación se debe a Romer, un astrónomo danés que vivió en el siglo XVII. Romer atribuyó los retrasos y adelantos en las ocultaciones y los eclipses de los satélites galileanos de Júpiter al hecho de que la luz viaja a una velocidad muy elevada, pero finita. De sus mediciones, resultó un valor de 200.000 km/s, aproximadamente. Es un valor inferior al real, pero ya bastante bueno para la época.

EL BAILE DE LOS SATÉLITES GALILEANOS

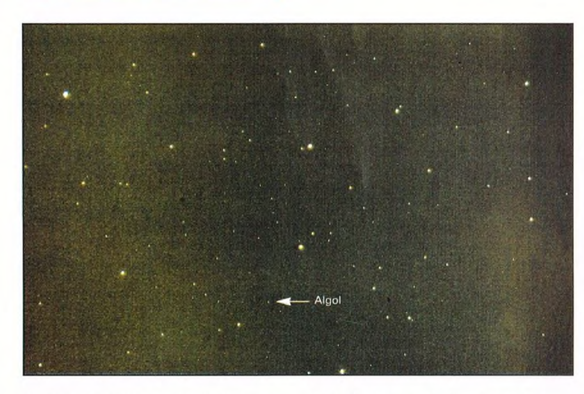
Hace algunos años, el plano de rotación de Júpiter pasó por el de la órbita terrestre. En tales condiciones, también el plano de las órbitas de los satélites de dicho planeta y, especialmente, de los más luminosos, es decir, los galileanos, se encuentra de modo que se ve de perfil. Por consiguiente, pueden producirse ocultaciones recíprocas entre satélites. El estudio de tales fenómenos permite obtener datos precisos sobre la órbita de estos objetos en su movimiento alrededor de Júpiter. Una situación análoga se produce cuando el plano ecuatorial de Saturno coincide con la línea de observación del planeta anillado desde la Tierra: de este modo pueden observarse las recíprocas ocultaciones de los satélites más luminosos de este planeta.

EL DESCUBRIMIENTO DE LOS ANILLOS DE URANO

Las ocultaciones han sido también protagonistas de descubrimientos de objetos



A la izquierda, la constelación de Leo, como todas las del zodíaco, se ve favorecida por las ocultaciones. La Luna y los planetas se mueven por una franja celeste, el cinturón zodiacal, próxima a la eclíptica. Las ocultaciones son particularmente espectaculares si el protagonista es una estrella brillante, como Régulo, la más luminosa del León celeste.



A la izquierda, en la constelación de Perseo hay una estrella, Algol, cuya luminosidad disminuye periódicamente. Este comportamiento se debe a la presencia de una compañera muy próxima que orbita en un plano situado casi en línea con la dirección de observación desde la Tierra, lo que da lugar a ocultaciones recíprocas entre ambos astros.

no observados anteriormente. Es el caso de los anillos de Urano. Sobre la estructura de estas formaciones que orbitan alrededor del séptimo planeta, y que son invisibles con los telescopios situados en tierra, hoy sabemos muchas cosas gracias a las misiones Voyager que pasaron cerca de este lejano hermano de la Tierra. Sin embargo, su descubrimiento fue anterior al paso de la sonda Voyager 2 por las cercanías de Urano. La comunidad astronómica se movilizó en una ocasión en que Urano debía ocultar una estrella. Para este acontecimiento se prepararon fotómetros sensibles, que miden la cantidad de luz procedente de un astro, de manera que pudieran acusar la disminución de luminosidad al pasar el disco de Urano por delante de la estrella. Con ello, se esperaba obtener noticias sobre las capas más externas de la atmósfera de Urano y sobre la eventual presencia de anillos, presencia que sólo era una hipótesis apuntada por analogía con Saturno, puesto que ningún observatorio astronómico había logrado demostrar su existencia. Hay que recordar que el eje de rotación de Urano está inclinado unos 90° respecto al plano orbital, lo que significa que en su movimiento de revolución alrededor del Sol, este planeta expone alternativamente el polo Norte y el polo Sur en dirección a nuestra estrella. Por tanto, si hubiese anillos, serían visibles prácticamente «de cara» y, mientras Urano se aproximase a la estrella a la que debía ocultar, se observarían pequeñas disminuciones en la luminosidad del astro lejano en concomitancia con el paso de los anillos por delante de él. Después de la desaparición y la siguiente reaparición de la estrella detrás del disco del planeta, estas caídas de luminosidad se repetirían de manera simétrica. Es imaginable, pues, la curiosidad con que se esperaba el acontecimiento. El resultado confirmó totalmente la hipótesis de la existencia de anillos: en la trayectoria seguida con los datos de los fotómetros, fue posible observar pequeñas caídas de luminosidad de la estrella ocultada, dispuestas simétricamente respecto a la más profunda provocada por el disco de Urano. De este modo, el séptimo planeta podía acompañar a Saturno en la posesión de un sistema de anillos dispuesto en el plano ecuatorial.

Abajo, la ocultación más espectacular se produce cuando la Luna esconde esta estrella un poco especial que es el Sol. Si es así, el efecto resulta mucho más impresionante que cuando el objeto que se oculta es otro astro.

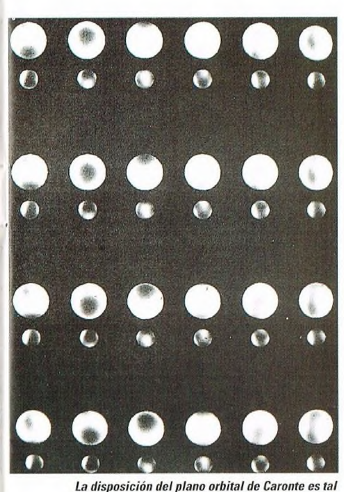
LAS ÓRBITAS DE LOS ASTEROIDES

Actualmente, las ocultaciones son muy seguidas por los astrónomos y los aficionados; esta afición va acompañada generalmente de una gran pasión, hasta tal punto que producen resultados científicamente válidos. Estos fenómenos permiten perfeccionar el conocimiento de las órbitas de los pequeños cuerpos del sistema solar, es decir, de los asteroides. Sin embargo, muchas veces se necesita

Abajo, los anillos de Saturno dan una imagen concreta de su plano ecuatorial y del plano orbital de sus satélites. Cuando los anillos están de perfil, es posible observar también eclipses recíprocos entre los satélites de este planeta.

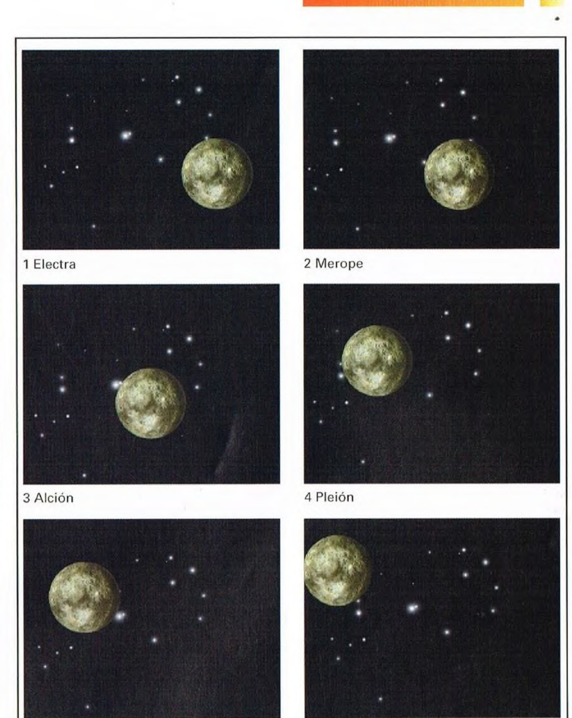






La disposición del plano orbital de Caronte es tal que en ciertas posiciones de la órbita produce eclipses recíprocos que se han aprovechado para descubrir las variaciones de reflectividad de ambos objetos celestes.

que un asteroide pase frente a una estrella. Entonces, una evaluación cuidadosa de los respectivos instantes en los que la estrella se oculta y reaparece, junto a una determinación exacta de las coordenadas geográficas del lugar desde donde se ha hecho la observación, permiten determinar la posición precisa del asteroide. Las órbitas de estos pequeños cuerpos se conocen con cierto margen de precisión y, para reducirlo, puede recurrirse a este tipo de observaciones. La posición de las estrellas es bien conocida, sobre todo después de la misión del satélite Hipparcos, que ha registrado con extraordinaria exactitud la posición de millares de estrellas en el firmamento. Así, pues, estas estrellas representan un excelente sistema de referencia al que acudir cuando se efectúan medidas de posición. Por tanto,



Secuencia de imágenes en las que se ve la Luna atravesando las Pléyades y ocultando algunas de sus estrellas principales.

las ocultaciones, además de representar un singular fenómeno en el que dos astros juegan al escondite, constituyen un instrumento de investigación muy interesante, sobre todo a nivel astrométrico, ya que permite hacer mediciones precisas de coordenadas y de instantes temporales, necesarios para describir más cuidadosamente las órbitas de los objetos del sistema solar. También a lo largo de la historia ha quedado demostrado que ha sido posible aprender mucho con la observación de las ocultaciones.



Desde algunos lugares, las ocultaciones de estrellas por la Luna son de tipo rasante, útiles para estudiar los perfiles de los montes y de los cráteres lunares.

EL PRIMER CUÁSAR

3C 273 fue el fundador de la familia de los cuásares; la sigla que lo identifica nos indica que se trata del 273º objeto del tercer catálogo del radiotelescopio de Cambridge. Gracias a una ocultación lunar se consiguió situar con precisión en el firmamento esta radiofuente y asociarla a la que se creía era una pequeña estrella de magnitud 13. Sólo al analizar su espectro se descubrió que se trataba de una fuente muy lejana. Más tarde, se descubrió la estructura de la galaxia que alberga el cuásar.

MEDIDA DE LAS DISTANCIAS EN LA VÍA LÁCTEA

¿A qué distancia se hallan las estrellas? ¿Y los cúmulos estelares de la Vía Láctea? A estas preguntas, los astrónomos responden con un paciente trabajo teórico y de observación, que permite avanzar cada vez más lejos en las profundidades del cosmos.



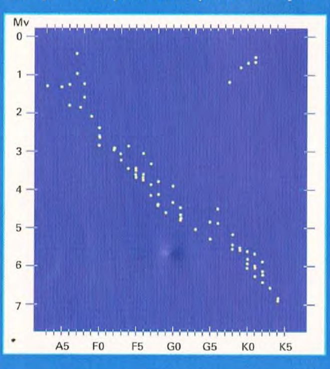
Hemos tratado ya de los métodos de medida de las distancias estelares: la paralaje anual, la secular y el método de los puntos convergentes para los cúmulos abiertos. Estos métodos son básicos en la llamada escala de las distancias y se aplican a estrellas relativamente cercanas. Pero hay también otros muchos métodos que permiten llegar a mayores distancias o que sirven como test de los métodos anteriores. En efecto, es importante poder medir la distancia a un mismo objeto con métodos diferentes, a fin de evaluar la fiabilidad y la precisión de las técnicas utilizadas.

EL CÚMULO DE LAS HÍADES

Las estrellas pertenecientes a los cúmulos son importantes bajo muchos aspectos. La homogeneidad de su composición química y de edad permite hacer estudios importantes sobre la evolución estelar. Por otra parte, el hecho de que todas las estrellas de un mismo cúmulo estén aproximadamente a la misma distancia de la Tierra, hace que estos objetos sean muy interesantes para la escala de distancias cósmicas. En efecto, midiendo la distancia de una sola estrella de un cúmulo, se obtiene automáticamente la distancia de todas las demás.

El cúmulo abierto más estudiado es probablemente el de las Híades, en la constelación de Tauro. Su distancia se ha calculado con diversos métodos, entre ellos el de los puntos convergentes. A pesar de que el valor de la distancia estimada a este cúmulo se ha incrementado aproximadamente el 30% entre los años 1939 y 1980 (lo que es un indicador de la dificultad que entrañan estas mediciones), hoy puede afirmarse razonablemente que las Híades se encuentran a unos 140 años luz de la Tierra.





Arriba, fotografía del cúmulo abierto de las Híades, en la constelación de Tauro. Situado a unos 140 años luz de la Tierra, este cúmulo ha tenido un papel muy importante en la escala de las distancias. A la izquierda, diagrama H-R del cúmulo de las Híades. Comparándolo con el diagrama homólogo de otros cúmulos, es posible saber la distancia a estos últimos.

Partiendo de este dato, las Híades sirven para calcular la distancia a otros cúmulos estelares similares. Conociendo la distancia con bastante precisión, es posible construir el diagrama de Hertzsprung-Russell de las estrellas de las Híades, disponiendo en un gráfico la magnitud absoluta en función de la temperatura (o del tipo espectral). Así se obtiene un diagrama H-R clásico, con una secuencia principal bien definida.

AJUSTE DE LA SECUENCIA PRINCIPAL

Para obtener la distancia a otros cúmulos más lejanos, por ejemplo las Pléyades, puede procederse del modo siguiente: se construye el diagrama H-R para estos cúmulos, en el que aparecerá, sobre el eje vertical, la magnitud relativa (no la absoluta, ya que ésta depende de la distancia, que todavía está por determinar), siempre en relación con la temperatura. Luego se compara el diagrama H-R obtenido con el de las Híades, que es muy similar, especialmente en lo que se refiere a las secuencias principales.

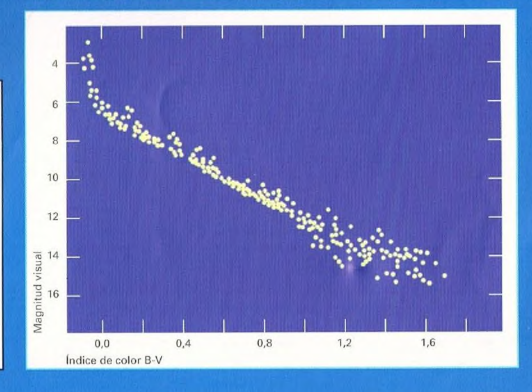
Superponiendo ambos diagramas de manera que coincidan al máximo, puede posicionarse en el eje vertical la secuencia principal del cúmulo cuya distancia quiere medirse. De este modo,

Arriba, nebulosa de reflexión alrededor de estrellas del cúmulo abierto de las Pléyades (M45 o NGC 1432), en la constelación de Tauro. Abajo, diagrama H-R del cúmulo de las Pléyades. En este cúmulo no hay estrellas gigantes ni enanas.

DATOS

DISTANCIAS A LOS CÚMULOS ABIERTOS MÁS PRÓXIMOS

CÚMULO	DISTANCIA (años luz)
Cúmulo de la Osa Mayor	72
Híades	140
Cabellera Ber	290
Pléyades	425
IC 2391	490
IC 2602	490
α Persei	550
M 44	570
NGC 2451	650
ξ Sco	780







A la izquierda, en la primera imagen vemos la estrella RR Lyrae, la más brillante en el centro del campo. Se trata de una variable pulsante, prototipo de una categoría de estrellas que se encuentran muchas veces en el interior de los cúmulos globulares y que se utilizan para medir distancias. La segunda imagen muestra la estrella W Virginis. También representa una categoría de estrellas que se emplean como candelas patrón para la medición de distancias.

en el gráfico se lee la magnitud absoluta de las estrellas del cúmulo, y a partir de ella podrá llegarse a la distancia, según la conocida relación: $m - M = 5 \cdot \log(d) - 5$, donde m es la magnitud aparente, M la absoluta y d la distancia.

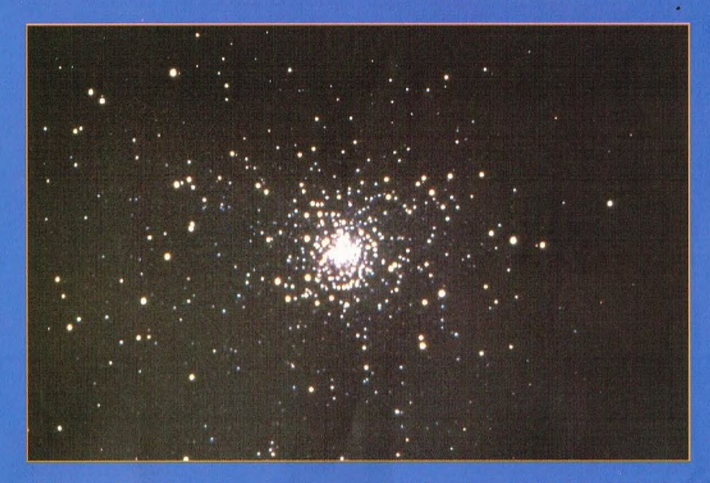
Este procedimiento, llamado en inglés *Main Sequence Fitting* (ajuste de la secuencia principal), puede aplicarse a varios cúmulos abiertos, como NGC 2362, Alfa *Persei*, III *Cephei* o NGC 6611. También se ha querido calcular la distancia al famoso doble cúmulo de la constelación de Perseo (Eta y Xi *Persei*), que contiene muchas estrellas supergigantes de gran luminosidad, y también cefeidas, utilizadas para el cálculo de las distancias. Sin embargo, las medidas todavía no concuerdan.

Con el método del *Main Sequence Fitting* es posible medir distancias hasta unos 20.000 o 25.000 años luz que, a pesar de todo, únicamente representan una quinta parte del diámetro de nuestra Galaxia.

EL PROBLEMA DEL LINE BLANKETING

Aplicando el método antes descrito para la determinación de la distancia de cúmulos abiertos

Abajo, fotografía de una parte de la constelación de Virgo. La flecha indica la estrella más brillante, Spica. Se trata de una gigante azul de tipo espectral B, con una temperatura de unos 20.000 K.



A la derecha, fotografía de aficionado del cúmulo globular M4, en la constelación de Escorpión. Se trata del cúmulo globular más próximo a nuestro sistema solar, situado a unos 7.000 años luz de distancia.

relativamente lejanos, hay que tener en cuenta un efecto, llamado en inglés *Line Blanketing*, que puede introducir inexactitud en las medidas. Se trata de la absorción de la luz debida a la presencia, en los espectros de las estrellas del cúmulo, de una infinidad de rayas provocadas por los elementos químicos pesados (carbono, nitrógeno, oxígeno, etc.), presentes en pequeñas cantidades en las capas superficiales de los astros.

Por ejemplo, si las estrellas del cúmulo objeto de estudio tienen una composición química con un porcentaje de elementos pesados más bajo que el de las Híadas, el efecto será menor y las estrellas aparecerán más brillantes, especialmente en las longitudes de onda del ultravioleta, donde este efecto es más importante. Si, por el contrario, la presencia de elementos pesados es mayor que en las Híadas, las estrellas aparecerán más débiles.

Sin embargo, la composición química de la mayor parte de los cúmulos abiertos próximos al Sol es similar a la de nuestra estrella. Por el contrario, las estrellas de las Híadas presentan una gran cantidad de elementos pesados, aproximadamente 1,6 veces mayor que la que hay en el Sol.

CEFEIDAS Y VARIABLES PULSANTES

Ya hemos hablado anteriormente de las estrellas variables cefeidas. Se trata de estrellas pulsantes, que cambian su luminosidad a causa de expansiones y contracciones sucesivas, producidas en un tiempo característico llamado período, generalmente comprendido entre 1 y 50 días. La propiedad más interesante de las cefeidas es que el período de pulsación depende de la magnitud absoluta: cuanto más largo es, más intrínsecamente luminosa es la estrella. Por consiguiente, si en

Abajo, imagen del cúmulo globular M11, en la constelación del Escudo. Los cúmulos globulares también se utilizan como patrones de luminosidad para medir las distancias a las galaxias.



DATOS

DISTANCIAS A LOS CÚMULOS GLOBULARES MÁS PRÓXIMOS

CÚMULOS	DISTANCIA (años luz)
M4	7.200
NGC 6397	7.500
NGC 6539	8.100*
M22	10.400
Pal 6	11.400*
M71	13.400
NGC 6440	13.400
NGC 6752	13.700
NGC 6760	14.000
NGC 6366	14.300*
M10	14.700

* medidas inciertas



Arriba, imagen de aficionado del cúmulo abierto M93, situado en la constelación de la Popa. En el interior de este cúmulo se han identificado diversas gigantes azules.

el firmamento se consigue identificar una cefeida y medir su período, es posible calcular también la distancia. Dado que las cefeidas son estrellas bastante luminosas, son observables tanto en la Vía Láctea como en las galaxias externas más próximas (M31, M33, NGC 2403, la Gran y la Pequeña Nube de Magallanes), lo que permite calcular su distancia. El telescopio espacial Hubble ha logrado identificar cefeidas incluso en galaxias bastante lejanas, fuera del Grupo Local al cual pertenece la Vía Láctea. Con esto, nuestro conocimiento de la escala de las distancias del universo se ha incrementado.

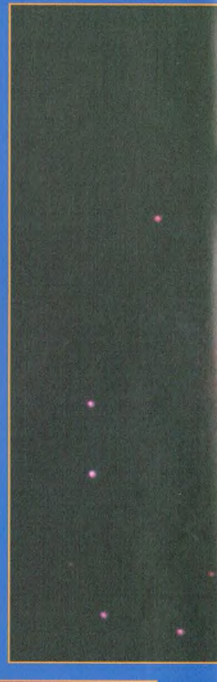
INTENSIDAD DE LA LUZ Y DISTANCIA

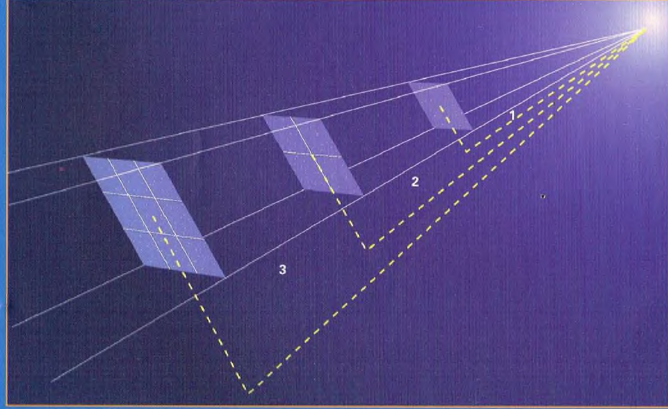
La luz que proviene de un objeto celeste aparece más débil cuanto más alejado está el objeto. La ley física que expresa este debilitamiento es una de las leyes más conocidas de la óptica, y establece que la intensidad luminosa *I* es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia d: $I \sim 1/d^2$. Por ejemplo, si una galaxia que se halla a una distancia de 10 millones de años luz tiene una determinada luminosidad, una galaxia idéntica que se encuentre a doble distancia –20 millones de años luz– presenta una luminosidad de sólo un cuarto de la primera. Más allá de la relación matemática, lo que interesa es que entre estas dos magnitudes, *I* y *d*, existe una relación precisa y medible.

En términos estrictamente astronómicos, esto significa que la intensidad luminosa representa la magnitud absoluta *M* de un determinado objeto celeste cuya distancia quiere medirse. Utilizando una vez más la relación antes indicada, $m - M = 5 \cdot \log(d) - 5$, que es una consecuencia directa de la ley de atenuación de la intensidad luminosa, puede observarse que, como *m* (magnitud aparente) es siempre medible con un fotómetro, si se conoce *M* es posible obtener *d*, la única incógnita de la relación. Por tanto, es evidente que, si fuese posible tener clases de objetos celestes de luminosidad intrínseca (es decir, de magnitud absoluta conocida), la relación anterior podría utilizarse para conocer la distancia.

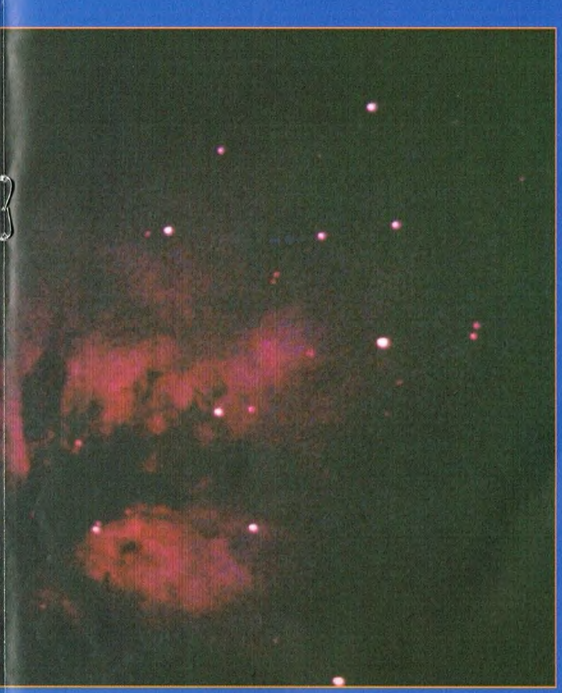
LA CANDELA PATRÓN

Los objetos celestes que tienen la característica anteriormente indicada se llaman candelas patrón o candelas estándar. La base del concepto de candela patrón es, naturalmente, una hipótesis muy importante y restrictiva: todos los objetos pertenecientes a una clase utilizada con este fin tienen la misma magnitud absoluta. Además de las cefeidas, se utilizan como candelas patrón muchos otros tipos de objetos: las variables W *Virginis* y RR *Lyrae*, que son estrellas pulsantes parecidas a las cefeidas, las últimas de las cuales se encuentran sobre todo en los cúmulos globulares; las estrellas supergigantes rojas y azules, de gran luminosidad y, por tanto, visibles también a distancias considerables; las novas, unas estrellas binarias que aumentan súbitamente de luminosidad de manera





El esquema de la derecha representa cómo disminuye la intensidad luminosa de una fuente cualquiera (una lámpara, una estrella o una galaxia) al aumentar la distancia al observador. Por ejemplo, si la distancia se dobla, la intensidad se reduce a un cuarto, ya que la misma luz se distribuye sobre una superficie cuatro veces mayor.



Arriba, esta nube de gas en nuestra Galaxia muestra vastas regiones oscuras debidas a polvos interestelares.

no regular; o las supernovas, unas estrellas de gran masa que, al final de su existencia, explosionan de manera espectacular y destructiva. Estas últimas son visibles incluso en galaxias lejanísimas, porque cuando explosionan pueden ser durante un tiempo breve más luminosas que toda la galaxia a la cual pertenecen.

Todos estos objetos forman parte de los llamados indicadores primarios de distancia, porque proporcionan la base sobre la cual pueden calibrarse métodos que sirven para remontarse todavía más lejos en el universo.

UN TRABAJO DE CALIBRACIÓN Y DE PASOS SUCESIVOS

Luego, en la práctica se actúa según un proceso de pasos sucesivos. Por ejemplo, se observa una nova relativamente próxima, cuya distancia es posible calcular midiendo la paralaje, o simplemente porque forma parte de un cúmulo en el que hay también cefeidas. Gracias a esto, puede hacerse una estimación de su magnitud absoluta; se calibra la habitual relación en la que intervienen magnitud relativa, absoluta y distancia, y se establece

UN PROBLEMA CRUCIAL

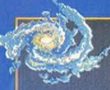
La Vía Láctea contiene diversos tipos de objetos celestes: estrellas, cúmulos, nebulosas, etc. Determinar su distancia significa comprender cómo está hecha nuestra Galaxia y cuál es nuestra posición dentro de ella. El problema de la medición de las distancias es uno de los más cruciales de la astrofísica moderna.

la hipótesis de que todas las novas de un cierto tipo tienen la misma luminosidad intrínseca. Cuando aparezca otra nova en un lugar cualquiera de nuestra Galaxia, podrá medirse su distancia utilizando la relación que acaba de calibrarse.

ABSORCIÓN INTERESTELAR

Uno de los mayores problemas relacionados con los diversos métodos de medida de distancias antes descritos es el de la absorción estelar. En efecto, la luz de un objeto lejano, cuando viaja hacia la Tierra, ha de recorrer unas distancias enormes. Durante este largo recorrido, puede encontrar regiones del espacio interestelar en las que el polvo y los gases sean abundantes. Esto hace que parte de la luz sea absorbida y, por tanto, que llegue debilitada a los telescopios situados en la Tierra. Los astrónomos hablan entonces de extinción de la luz. Evaluar la entidad de esta extinción resulta muy difícil, pero es fundamental si hay que utilizar métodos como el de la candela patrón. Teniendo en cuenta que todo el problema se reduce a medidas de magnitud, es importante que tales medidas sean fiables y que no dependan de la dirección del espacio en que se está observando.

Si se observa un objeto perteneciente a nuestra Galaxia, evaluar la extinción es más fácil, ya que basta considerar el polvo y los gases que hay en la Vía Láctea, que son bien conocidos. En cambio, si el objeto observado está en otra galaxia, además de la posible extinción debida al trayecto que recorre la luz en la Vía Láctea, también hay que tener en cuenta la posibilidad de que una parte de dicha luz sea absorbida a lo largo del recorrido que hace por la galaxia de partida, y esta estimación es mucho más difícil.



LA RELACIÓN PERÍODO-LUMINOSIDAD

Las cefeidas son unos indicadores importantísimos de distancia, ya que su período de pulsación depende de su magnitud absoluta. Es decir, para ellas es válida una relación del tipo:

$M = A - B \cdot \log(P)$

donde *A* y *B* son constantes, *P* es el período en días y *M* la magnitud absoluta.

La determinación de las dos constantes es muy difícil, y diversos científicos han hallado resultados diferentes. La que parece más plausible conduce a la relación:

$M = -2{,}46 - 3{,}42 \cdot \log(P) + C$

propuesta por los dos famosos astrónomos Sandage y Tamman en 1984, donde *C* es un término que tiene en cuenta la absorción interestelar, es decir, la atenuación que sufre la luz de las estrellas en su largo viaje hacia la Tierra.

ARIES

La constelación de Aries se considera la primera del zodíaco porque antiguamente contenía el punto equinoccial que todavía hoy se denomina Punto Aries.



Como todas las constelaciones del zodíaco, la de Aries tiene unos orígenes remotos. Representa el animal de los cuernos en espiral que también se reproducía en los dispositivos utilizados antiguamente para derribar las puertas de ciudades y fortificaciones.

CÓMO LOCALIZAR LA CONSTELACIÓN

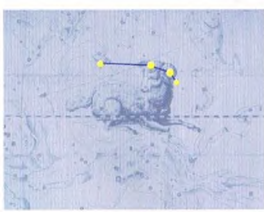
Aries se encuentra al sur del Triángulo. Su estrella más luminosa, Alfa, está a unos 20° al sur de Gamma *Andromedae*. Para dar una idea de cuál es esta distancia, nos bastará extender ante nosotros el brazo rígidamente: 20° corresponden aproximadamente a la distancia que media entre las puntas del pulgar y del meñique, manteniendo la mano abierta al máximo. Por tanto, se puede decir que Alfa *Arietis* está un palmo al sur de Gamma *Andromedae*.

ESTRELLAS NOTABLES

Alfa (magnitud 2), o Hamal, no tiene atractivos particulares excepto ser, como ya se ha dicho, la más luminosa de la constelación. Es una estrella amarilla que dista de la Tierra 85 años luz. Gamma es una interesante estrella doble, descubierta por Robert Hooke en el siglo XVII. Está formada por dos astros de igual magnitud (4,8). Lambda también es doble, separable incluso con pequeños instrumentos en dos estrellas blancas de magnitud 4,9 y 7,7. Otros dos pares de estrellas son Épsilon y Pi, aunque éstas, para resolverse, necesitan instrumentos de apertura superior a 10 cm y grandes aumentos. 53 *Arietis*, que tiene una magnitud 6,1, está, pues, por debajo del umbral de percepción a simple vista. Es una estrella que va alejándose rápidamente de la zona de origen (se formó en las cercanías de la nebulosa de Orión). No se conocen exactamente las causas que han llevado esta estrella hasta tan lejos del lugar donde nació, pero sabemos que existen otras dos estrellas como ésta que son originarias de la misma región y que actualmente están muy lejos del lugar donde se formaron: My *Columbae* y AE *Aurigae*.



Arriba, la galaxia NGC 772 es el objeto más luminoso de la constelación, pero, por ser de magnitud 11, es necesario un telescopio de 25 cm para una observación discreta.



En las representaciones del firmamento, contrariamente a lo que cuenta la leyenda, Aries carece de alas.

DÓNDE BUSCARLA

ARIES

La constelación de Aries abarca una región del cielo comprendida entre 10° N y 30° N de declinación, y entre 1 hora 40 minutos y 3 horas 20 minutos de ascensión recta. Es visible desde las latitudes correspondientes a todo el hemisferio septentrional y desde latitudes correspondientes al hemisferio meridional hasta 60° S. Desde latitudes más al sur que 60° S nunca es enteramente visible. Aries se encuentra en oposición al Sol entre fines de octubre y comienzos de noviembre.

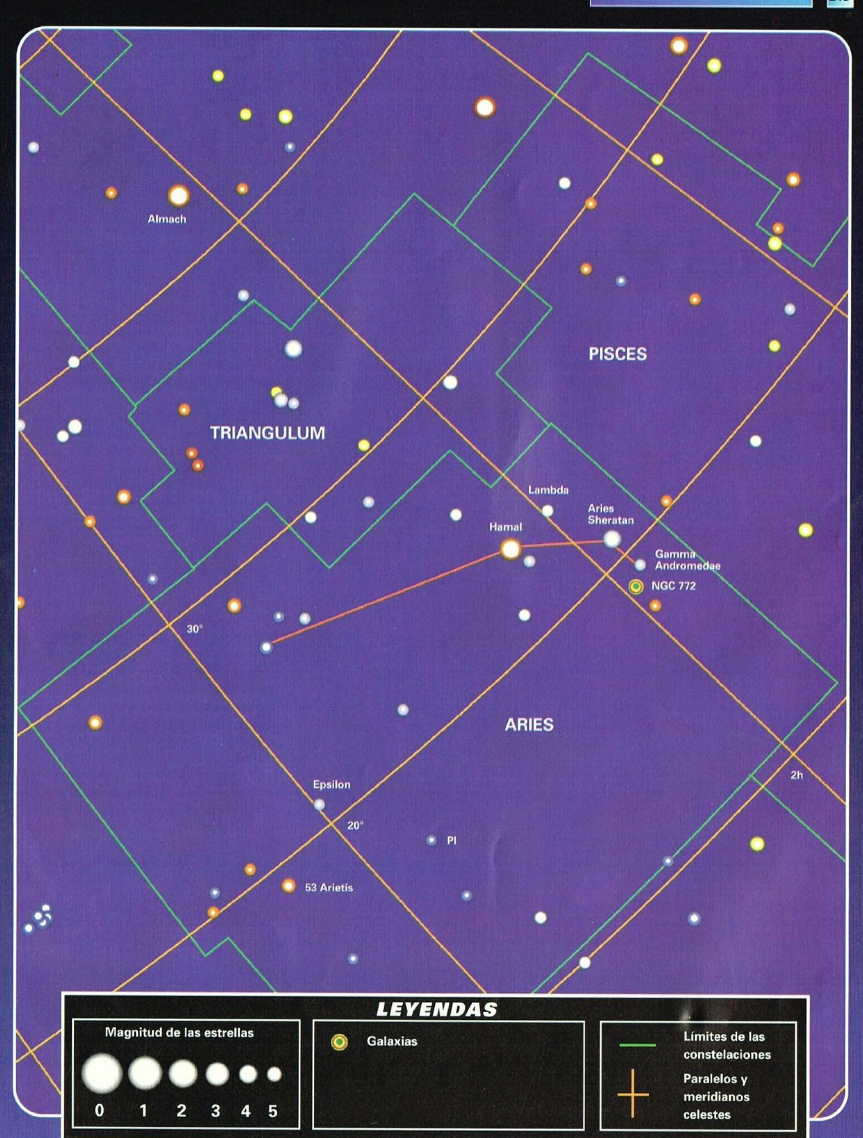
LOS MITOS Y LAS ESTRELLAS

ARIES

Aries es el animal alado del vellocino de oro que Néfele, la reina de Beocia, abandonada por su marido Atamante, mandó a la Tierra para salvar a sus hijos, Frixo y Hele, que iban a ser sacrificados por su padre. Éste había sido engañado por Ino, su nueva compañera, que no quería a los hijos de la anterior mujer de Atamante y había urdido una trama para eliminarlos. La intervención de Néfele les salvó la vida: apenas vieron al carnero, le saltaron encima y volaron hacia la Cólquida. Pero durante el viaje, Hele cayó en el brazo de mar que separa Asia Menor de Europa y se ahogó. En su honor, los griegos bautizaron aquel estrecho con el nombre de Helesponto. Llegado a la Cólquida, Frixo sacrificó al carnero y ofreció el vellocino al rey local, Eetes, cuya hija, Calcíope, desposó. Una vez muerto, Frixo volvió a su patria en forma de espectro para atormentar a su primo Pelias que había destronado al rey de Tesalia. En realidad, el reino esperaba a Jasón, y Pelias prometió restituírselo si conseguía llevarle el vellocino de oro. Jasón, entonces, emprendió la expedición con los Argonautas y llegó a la Cólquida. Como el rey Eetes se opuso a la devolución del vellocino, decidió robarlo furtivamente, pero el precioso manto estaba custodiado por una serpiente que nunca dormía. Jasón contó con la ayuda de la hija de Eetes, Medea, con la cual se casó. Gracias a ella, Jasón consiguió culminar su empresa.

OTROS OBJETOS DE ARIES

Aries no contiene objetos de fácil observación: en su interior, las galaxias más luminosas son de decimoprimera magnitud, y se necesita un telescopio con una apertura superior a 25 cm para poderlas observar con facilidad. Entre ellas, recordemos NGC 772, la más luminosa: una galaxia en forma de espiral situada en las proximidades de Gamma. Sus dimensiones aparentes son 7' × 5'.


Almach
PISCES
TRIANGULUM
Lambda
Aries
Sheratan
Hamal
Gamma
Andromedae
NGC 772
30°
ARIES
2h
Epsilon
20°
PI
53 Arietis
LEYENDAS
Magnitud de las estrellas
0 1 2 3 4 5
Galaxias
Límites de las constelaciones
Paralelos y meridianos celestes

HIPPARCOS: UN ORDENADOR PARA CIEN MIL ESTRELLAS

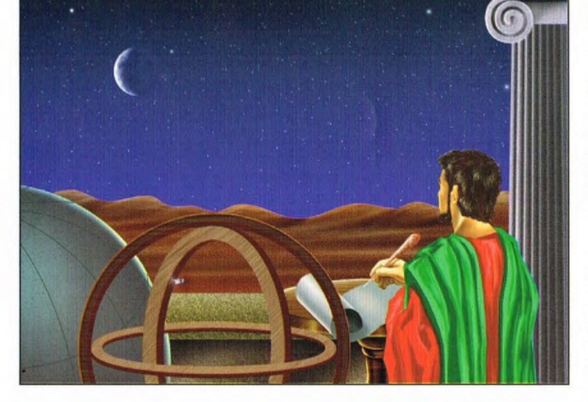
Para un astrónomo, conocer la posición exacta, la distancia y los movimientos de las estrellas en el firmamento tiene un valor inapreciable, porque permite comprobar hipótesis sobre las características físicas y la evolución de los astros. El Hipparcos ha facilitado estos valores para más de 100.000 estrellas.



Hipparcos, un satélite construido por la Agencia Espacial Europea, puede considerarse un éxito no sólo por los resultados importantes que ha dado, sino también porque ha demostrado la capacidad humana y técnica de la ESA para salvar una misión que parecía estar condenada al fracaso.

La astrometría puede definirse como la rama de la astronomía que se interesa por las relaciones geométricas entre los cuerpos celestes y sus movimientos reales o aparentes. En otras palabras, la misión de la astrometría es medir los movimientos de las estrellas, determinar sus posiciones respecto a otros cuerpos celestes y a un sistema de referencia en un tiempo determinado y, eventualmente, también respecto al modo en que éste cambia con el tiempo.

De una manera más explícita, puede decirse que el hecho de que la Tierra gire alrededor del Sol hace que, con observaciones sucesivas, una estrella parezca tener una oscilación aparente llamada paralaje. Aunque la paralaje sea muy pequeña, la precisión de su medida es fundamental para determinar las distancias estelares. Por otra parte, como el Sol y las estrellas tienen un movimiento relativo, sus posiciones aparentes cambian gradualmente, añadiéndose a la paralaje. Este efecto se conoce como movimiento propio de una estrella. Hasta el lanzamiento del Hipparcos, todas las medidas astrométricas se habían efectuado desde la Tierra, con todos los problemas que la turbulencia atmosférica (responsable también del brillo de las estrellas) comporta en la observación de los cuerpos celestes; esto sin considerar los errores de medición inducidos por las deformaciones térmicas y mecánicas, así como por la fuerza de la gravedad.



FINALMENTE, EL LANZAMIENTO

Para obviar estos inconvenientes, en 1966 nacía entre los astrónomos la idea de colocar un satélite fuera de la atmósfera. En los años que siguieron, fueron perfilándose cada vez más los objetivos que se querían alcanzar.

Finalmente, en 1980, el proyecto fue adoptado por la ESA y, en 1983, se hacía el estudio de factibilidad. Al año siguiente se iniciaron los estudios para el equipamiento del satélite. De este modo empezó a tomar forma la plataforma científica que, como demostración de la increíble habilidad de los «acronomistas espaciales», se llamó HIPPARCOS. Por una parte, el nombre del satélite recuerda al astrónomo griego que hacia el año 120 a.C., y con el único auxilio de su vista, compiló un catálogo de 1.000 estrellas que se utilizó durante más de 1.650 años. Hiparco estableció la posición relativa de los astros con muy buena precisión (20 minutos de arco). Por otra, Hipparcos es también las siglas de High Precision Parallax

El nombre de Hipparcos dado al satélite de la ESA se refiere al astrónomo griego Hiparco, autor de un catálogo que incluye 1.000 estrellas.
Arriba, el cuerpo del satélite.

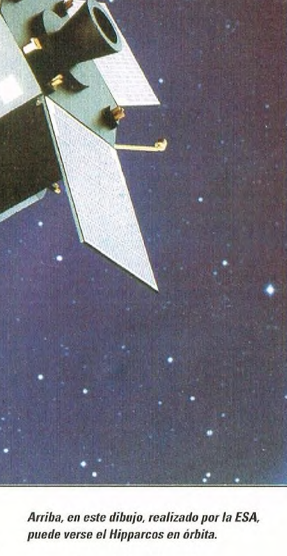
Collecting Satellite (satélite para la medida de la paralaje con alta precisión).

El satélite abandonó la Tierra a última hora de la tarde del 8 de agosto de 1989 como carga secundaria de un Ariane 4 en la versión de dos *boosters* de combustible líquido y dos de combustible sólido. El satélite primario era el TV-SAT 2.

La partida fue perfecta, pero falló la ascensión del motor de apogeo que era lo que debería haber permitido al Hipparcos llegar al punto de trabajo previsto. En un principio, se creyó que la misión debía considerarse fracasada, pero algunos cálculos hicieron pensar en la posibilidad de dar cierta operatividad al satélite si se efectuaban toda una serie de maniobras de salvamento. Aunque la órbita en la que había quedado, extremadamente elíptica, alcanzaba un apogeo de unos 36.000 km, tenía un perigeo demasiado bajo que llevaba al Hipparcos a atravesar los peligrosos cinturones de Van Allen, una región que rodea la Tierra en la que abundan protones y electrones dotados de gran energía.

En esta situación, los paneles solares se habrían degradado en un tiempo brevísimo, con la consiguiente deficiencia de la energía eléctrica disponible. Además, en los perigeos, el satélite habría quedado expuesto a otros factores de degradación como, por ejemplo, las considerables variaciones de gravedad y una resistencia aerodinámica provocada por la atmósfera más alta.

Después de haber evaluado todas las posibilidades de actuación, se decidió elevar la órbita del Hipparcos utilizando los pequeños motores que funcionaban con hidracina, y que originariamente se habían previsto para pequeñas maniobras orbitales. Un mes después del lanzamiento, el satélite era llevado a unos 640 km de altura (en el perigeo), una zona que los técnicos consideraban como bastante «tranquila».



Abajo, una imagen de la Tierra tomada a más de 37.000 km desde el espacio.



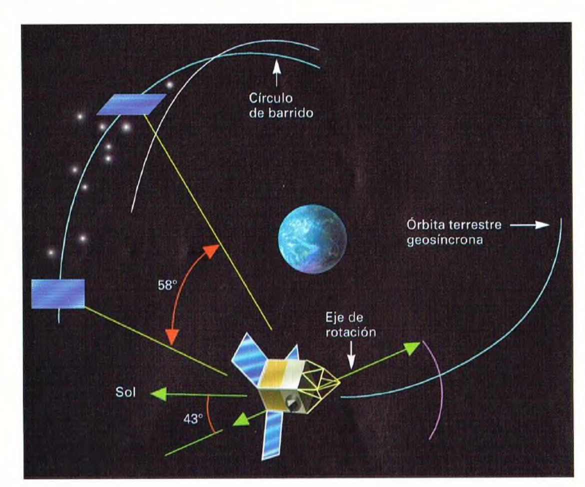
LA RECOGIDA DE DATOS

La operación siguiente fue crear una red de estaciones en tierra que permitiera tener el satélite a la vista durante todo el tiempo posible. Así, se activaron también las estaciones de Perth y Kourou, esta última sustituida después por la entrada en la red de la estación de Goldstone. La red en tierra perdía el satélite sólo durante una hora al día. Esto puede dar idea de la interacción, tan compleja como continuada, entre satélite y tierra, pero absolutamente necesaria para el funcionamiento correcto del Hipparcos. De este modo se aseguraban las condiciones básicas para el salvamento de la misión, a la vez que se conocía en cada instante la posición del satélite, con un margen de 1 km, y su velocidad, también con muy buena aproximación.

Arriba, en este dibujo, realizado por la ESA, puede verse el Hipparcos en órbita.

A finales de noviembre de 1989 empezaron las fases de calibración de los instrumentos. Una vez abierta la gran compuerta que cubría el ojo del telescopio, éste empezó la recogida de datos, ya que lo más esencial de todo el satélite era este telescopio de reflexión Schmidt.

El instrumento tenía dos grandes ventanas situadas a 180° entre sí e inclinadas 58°. La luz recogida en los dos campos de visión



El gráfico representa la configuración de la misión Hipparcos.

se concentraba en un espejo esférico (acabado con una precisión de 1/60 de la longitud de onda de la luz, es decir que, si el espejo hubiese tenido las dimensiones del océano Atlántico, su superficie se habría encrespado con olas de 10 cm de altura como máximo) y así los dos campos eran observables simultáneamente. Así fue posible medir el ángulo entre dos estrellas, ambas contenidas en el plano de la visual, teniendo en cuenta el ángulo básico de la inclinación (58°) y la separación aparente medida en el plano focal del telescopio.

Mediante un procesador se memorizaba el tamaño aparente de cada estrella, su posición conocida, y la relación con las otras estrellas. Todos estos datos se compilaban en un *Input Catalogue*. Pero la cantidad de valores obtenidos no podía ser gestionada por el procesador de a bordo. Por esto, fue necesario hacerlo conversar cada cinco minutos con los ordenadores más potentes del ESOC (European Space Operation Center) en tierra. El *Input Catalogue* ha sido reprogramado para la naturaleza diferente del trabajo, a pesar de lo cual los sensores de a bordo han reconocido estrellas y han podido efectuar el control de su posición con una exactitud comparable a la que lograría un observador desde la Tierra si, a simple vista, consiguiese subtender en la Luna ¡un arco igual al que separa los pies de la cabeza de un hombre!

Los datos, a falta de un aparato que los registrara a bordo, se enviaban al ESOC a razón de 24.000 unidades de información (bits) por segundo.

LOS RESULTADOS, EN DOS GRANDES CATÁLOGOS

El 8 de agosto de 1996, exactamente siete años después del lanzamiento del Hipparcos, la ESA (Agencia Espacial Europea) anunció la terminación y la distribución a la comunidad científica de los estados miembros del catálogo estelar más preciso y detallado jamás realizado hasta el momento. El trabajo y la vida del Hipparcos terminaron en 1993 después de haber transmitido a la Tierra un billón de datos sobre la posición de infinidad de estrellas.

Desde entonces, los ordenadores de gran potencia de media Europa han tratado la inmensa cantidad de informaciones y, al final de su trabajo, han definido las posiciones de todas aquellas estrellas con precisiones de 0,7 milésimas de segundo de arco, movimientos propios con 0,8 milésimas de segundo/año y magnitudes hasta la 7,124 con una precisión media de 15 diezmilésimas de magnitud. Y todo esto referido a 118.218 estrellas.

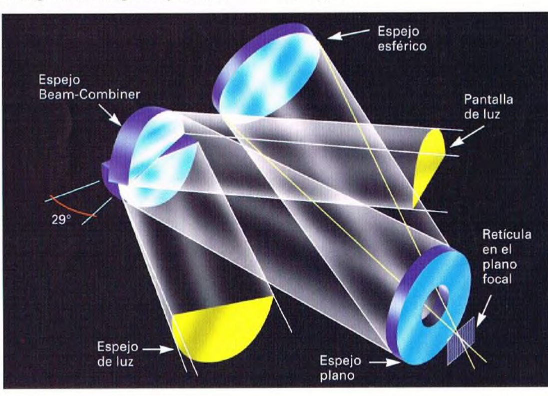
Las mediciones de las paralajes presentaron un error máximo del orden de 0,97 milisegundos, mientras que en las distancias de 20.853 estrellas la aproximación se ha evaluado en el 10%, y en otras 49.399 en el 20%. También se midieron 11.597 estrellas variables, 8.237 de las cuales eran nuevas, así como 23.882 sistemas binarios y múltiples, en parte conocidos y en parte no totalmente definidos.

Algunos datos preliminares de la sonda permitieron confirmar la existencia de cuerpos oscuros en órbita alrededor de algunas estrellas próximas, a pesar de que la incertidumbre sobre la orientación de los planos orbitales y la distancia real a los objetos hacen que sea extraordinariamente difícil determinar si se trata de planetas gigantes o de estrellas enanas.

DE HIPPARCOS A GAIA

Sin embargo, los primeros resultados han permitido establecer que, en dos de las

Abajo, dibujo de la estructura del telescopio del Hipparcos.





Arriba, en este grabado del siglo pasado, se ve a Copérnico en compañía de otros célebres astrónomos (Tolomeo, Tycho Brahe, Galileo, Kepler, Hevelius, Newton).

estrellas candidatas a tener planetas, los objetos interceptados serían enanas marrones más que planetas gigantes.

Además de este primer catálogo, un segundo, llamado Tycho, contiene datos referidos a 1.058.332 estrellas hasta la magnitud límite de 11,5 e informaciones sobre el color de las estrellas descritas.

La precisión de las posiciones astrométricas es del orden de 7 milisegundos para las estrellas hasta la magnitud 9, y de 25 milisegundos para las restantes hasta la magnitud 11,5. En cuanto a la precisión fotométrica, está garantizada hasta la centésima de magnitud. Aunque con precisiones ligeramente inferiores al catálogo Hipparcos, el Tycho también figurará entre los mejores disponibles, durante muchos años venideros.

Abajo, una imagen de M33 tomada en el espectro visible durante la misión Astro 1.



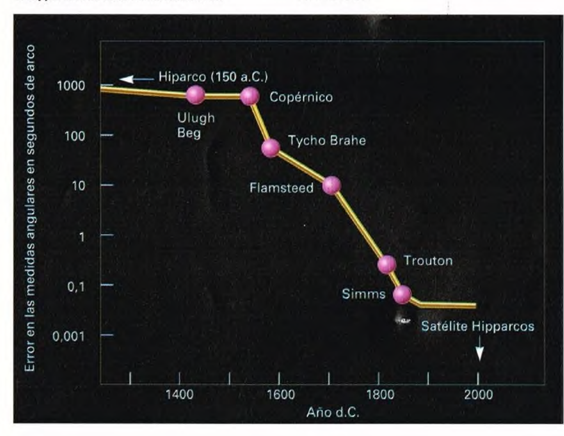
Las distancias estelares que se han obtenido con el método de las paralajes en base a los datos transmitidos por el Hipparcos han permitido incluir estrellas de hasta 1.000 años luz de distancia, superando 10 veces las medidas tradicionales. Esto ha permitido recalibrar la escala de las distancias con precisiones superiores a las que se habían conseguido hasta hoy.



Arriba, el cúmulo de galaxias Abell 426, en la constelación de Perseo.

Aunque el Hipparcos fue pensado para buscar planetas alrededor de estrellas lejanas, sus datos representan una gran ayuda a este trabajo, de manera que la ESA ya está pensando en el proyecto GAIA, que consistirá en un super-Hipparcos capaz de detectar las oscilaciones provocadas por planetas en las estrellas a cuyo alrededor giran. La ESA ha dado a conocer algunos detalles de esta misión, que prevé, además de la sonda en el espacio, un interferómetro óptico de base fija en Tierra y un sistema muy avanzado de detectores. La precisión que se espera en las medidas que facilitará será del orden de microsegundos de arco y se extenderá a decenas de millones de estrellas.

Abajo, el gráfico muestra la evolución del error de las medidas angulares en función del tiempo, desde Hiparco, astrónomo griego, hasta el Hipparcos, satélite de nuestros días.



EL TETHERED SATELLITE SYSTEM (TSS)

Nacido de un programa de colaboración entre Estados Unidos e Italia, el TSS abre un campo nuevo en el aprovechamiento del espacio. Considerado en un principio un proyecto imposible, la NASA lo eligió posteriormente por las muchas aplicaciones que puede tener en el futuro, colocado a bordo de un transbordador.



El Tethered Satellite System (TSS), sistema único y original en las actuales aplicaciones científicas espaciales, nació gracias a la intuición de un italiano, el profesor Giuseppe Colombo, de la Universidad de Padua.

Desde 1962 hasta finales de 1984, el profesor Colombo se dedicó a la astronáutica y a la mecánica celeste, materias a las que ha hecho aportaciones de gran importancia.

Hacia mediados de los años setenta, estimulado por el interés científico de algunas aplicaciones de los sistemas con cable para antenas transmisoras que le sugirió otro italiano, el profesor Grossi, Colombo estudió en profundidad estos conceptos y dio forma a la idea de un satélite unido a un transbordador mediante un cable.

Sin embargo, la idea de sistemas espaciales con cable no era completamente nueva. Ya a finales del siglo pasado, en 1895, el ruso Konstantin Tsiolkovski había tenido la idea de un ascensor que subiría a una torre de algunos kilómetros de altura, en cuya parte más alta se habría instalado un laboratorio espacial.

Al cabo de algunos años, la idea de la torre fue sustituida por la de una larguísima cadena anclada en la Tierra; a lo largo de esta cadena ascendería un ascensor espacial que permitiría acceder a un laboratorio sujeto en el otro extremo.



A la izquierda, insignia de la misión TSS-1R del Tethered Satellite System, nacido de la colaboración NASA/ASI.

A la derecha, durante la misión TSS-1R, los instrumentos y los materiales a bordo del satélite fueron probados minuciosamente.

DEL ESCEPTICISMO A LA FACTIBILIDAD

El advenimiento del transbordador espacial tuvo una importancia capital para el futuro de los sistemas con cable y representó el apoyo indispensable para dar vida a las intuiciones de Colombo.

Su idea fue acogida al principio con cierto escepticismo por la comunidad científica internacional. Pero Colombo consiguió despertar el interés de las agencias espaciales estadounidense e italiana que, en 1976, iniciaron los primeros estudios de factibilidad en el Smithsonian Center of Astrophisics y en la NASA (Estados Unidos).

Sin embargo, el proceso que había de dar vía libre al Tethered fue largo y complejo a causa de las innovaciones que había que introducir en el sistema. Sólo a finales de los años setenta, un estudio en profundidad de la definición del sistema desarrollado por la NASA llevó al convencimiento de que la idea podía concretarse en un programa de verificación: el programa Tethered Satellite System.

Se llegó, pues, al acuerdo intergubernamental de 1983 entre Italia y Estados Unidos que sancionó definitivamente la puesta en marcha de la fase de realización del proyecto. Su gestión se confió al PSN (ahora ASI), y la parte italiana asumía la responsabilidad de todo el satélite.

Corrían a cargo de la parte estadounidense, además del lanzamiento con el transbordador, los mecanismos de liberación y recuperación del satélite mediante el cable, misiones que la NASA confió al Martin Marietta Denver Aerospace.

Entretanto, se pidió a los científicos italianos y estadounidenses que presentaran sus propuestas de experimentos a bordo del satélite en la primera misión, destinada sobre todo a verificar la factibilidad del proyecto.

La selección de las numerosas propuestas orientaba la elección hacia una misión que estudiara las interacciones del sistema con la magnetosfera terrestre.

El programa preveía el lanzamiento para 1988, pero el incidente del Challenger influyó negativamente en todos los programas que tenían el transbordador como vehículo de transporte, lo cual también afectó al programa TSS. A pesar de todo, las actividades de desarrollo de los modelos de ingeniería del satélite y de la unidad de vuelo propiamente dicha prosiguieron hasta dar forma concreta al TSS.

A finales de 1990, el satélite, con sus equipos de prueba y la correspondiente documentación técnica de apoyo, dejó definitivamente Italia para instalarse en cabo Cañaveral. Desde allí, despegó en el transbordador Atlantis en julio de 1992.

CÓMO ESTÁ HECHO EL TETHERED Y CÓMO GENERA CORRIENTE ELÉCTRICA

El sistema Tethered (TSS) está constituido por un elemento, llamado *deployer* (TSSD), que permite desenrollar y arrollar el cable, y otro elemento satélite (TSS-S). Ambos están conectados entre sí por un fino cable conductor de 20 km de longitud.

El TSS es de forma esférica, con dos sustentadores fijos (el anterior, para la antena en banda S, más corto; el de la cola, para los magnetómetros y algunos sensores de los experimentos electrodinámicos, está construido en kevlar y su longitud es de casi 1 m) y dos brazos extensibles de una longitud de unos 2,5 m, dotados de sensores para explorar la región cargada eléctricamente que rodea el satélite.

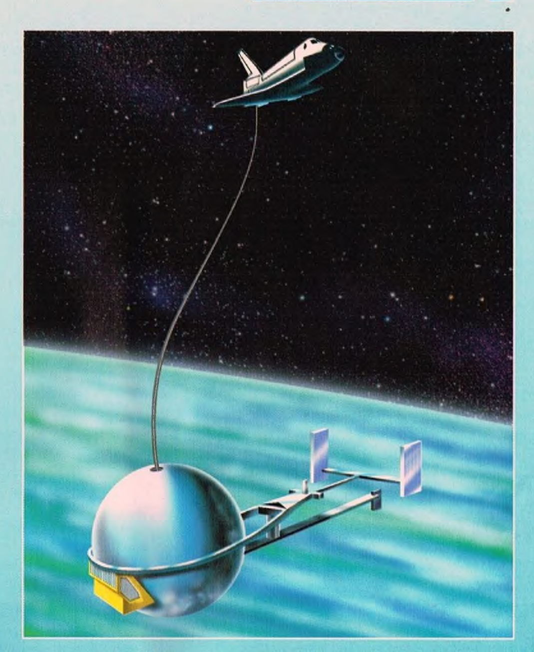
El TSS-1 mide 1,6 m de diámetro, tiene un volumen de 0,43 m^3 y pesa 518 kg, 70 de los cuales corresponden a aparatos científicos.

Fue proyectado para que pudiera ser aprovechado en varias misiones. El satélite está alimentado con baterías de 2.000 W colocadas en su parte inferior. El control de equilibrio, que se efectúa mediante sensores de tierra y solares, se consigue con ocho propulsores especiales: dos de ellos, dispuestos junto al cable, proporcionan el empuje vertical que facilita la liberación del satélite y el control de la tensión del cable. Los otros seis propulsores, instalados en la zona ecuatorial del satélite, controlan los movimientos de balanceo, cabeceo y giro.

La telemetría y las telecomunicaciones se efectúan gracias a un enlace en banda S con una capacidad de transferencia de 16 KB/s.

Para que las misiones tengan éxito, debe concederse una importancia muy especial al cable conductor *(tether)*. Visto en sección, puede apreciarse su gran complejidad. Alrededor de un núcleo interno están dispuestos 19 conductores de cobre –el elemento eléctricamente conductor– encerrados en una funda aislante que lo protege del exterior espacial. El diámetro externo del cable es de apenas 2,5 centímetros.

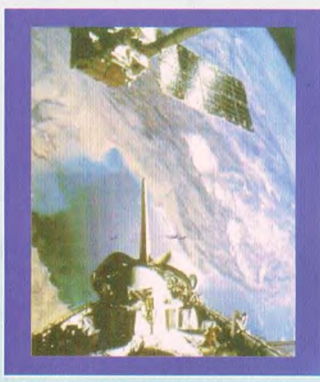
Por otra parte, para que la misión llegue a buen fin, es fundamental la instrumentación del *Core Equipment*. Estos instrumentos permiten generar y medir, en el interior del cable, un flujo de corriente eléctrica que aprovecha la interacción del sistema TSS con el campo magnético terrestre. El cable, aislado, pero eléctricamente conductor, al atravesar las líneas del campo magnético induce una diferencia de



Arriba, en este dibujo se ven perfectamente el transbordador y el satélite Tethered unido a aquél mediante el cable, enrollado y desenrollado por el* deployer *(TSSD).



A la izquierda, el momento crítico del lanzamiento del transbordador que llevaba a bordo el Tethered.



Arriba, en la imagen vemos, en primer plano, la parte posterior del transbordador con la cúpula del Tethered todavía en la base del asta. Al fondo, la Tierra.

potencial entre los dos extremos del sistema, el transbordador y el satélite. Esta diferencia de potencial sería inutilizable si el circuito no estuviese cerrado gracias a una emisión controlada de electrones hacia el plasma. Los electrones, producidos y acelerados por un cañón electrónico, se mueven a lo largo de las líneas del campo magnético terrestre hacia la región polar y penetran en la ionosfera para desviarse luego hacia el satélite.

En efecto, el satélite constituye el polo con potencial eléctrico positivo que atrae los electrones y, como tiene la superficie conductora, los dirige hacia un colector que los envía a lo largo del cable. Un amperímetro integrado en el satélite mide el flujo de corriente inducido por la acumulación de cargas retenidas en el propio satélite. Este flujo de corriente se había previsto en 0,5 amperios.

LA PRIMERA Y LA SEGUNDA MISIONES

Eran las 9.56 h del 31 de julio de 1992 en cabo Cañaveral cuando de la rampa de lanzamiento 39B despegaba el transbordador Atlantis para la 49ª misión de un transbordador. Llevaba como carga el primer satélite de cable, el Tethered. El Atlantis, cuyo vuelo ostentaba la sigla STS-46, se introducía en una órbita elegida a una altura de 425 km y luego a otra de 288 km de altura para iniciar, el 3 de agosto, las operaciones necesarias para hacer salir el satélite TSS-1. Al día siguiente se alzaba el satélite a la parte superior de la bodega de carga. Al poco, debían separarse los dos cables umbilicales que llevaban, respectivamente, la energía y los mandos de los aparatos del satélite. Pero este último se negaba a separarse: la baja temperatura del espacio había bloqueado la conexión. Después de una serie de intentos que incluyeron la orientación del transbordador en dirección al Sol, el cable se separaba de su alojamiento mediante el empuje de sus dos pequeños motores.

El satélite debería haberse elevado hasta 20 km «colgado» de su cable, pero después de apenas 10 cm, se bloqueó por primera vez: un problema en el motor, dispuesto encima del regulador de la tensión del cable, impedía que éste continuara desenrollándose. Después de muchísimos intentos, también este problema se resolvió. Todo parecía ir mejor, cuando a 179 m de altura respecto al transbordador, el TSS volvió a pararse. Otras tentativas y el cable se desenrolló nuevamente hasta 256 m. Aquí se detuvo por tercera vez y definitivamente.

Un perno estropeado impedía que el cable continuara desenrollándose. Eran las 9 de la noche en Houston, lo que hizo que los nuevos intentos se aplazaran hasta el día siguiente. Pero el 5 de agosto tampoco pudo hacerse nada, y las reservas de combustible a bordo del satélite se habían consumido en gran parte en las operaciones anteriores: de los 55 kg iniciales únicamente quedaban 8. Se decidió entonces la recuperación del satélite, que pudo hacerse normalmente a pesar de los temores que había suscitado la operación. A las 17.53 h del 5 de agosto, el Tethered estaba nuevamente en la bodega de carga.

La salida había durado 25 horas y 34 minutos. A pesar de que la misión no había cumplido sus objetivos, sí había demostrado que el sistema Tethered podía funcionar. Tampoco la segunda misión obtuvo un éxito plenamente satisfactorio.

Iniciada el 22 de febrero de 1996, después de que el TSS se situara a 19.200 m del transbordador y cumpliera la mayor parte de los experimentos previstos, el cable que sujetaba el satélite se rompió y el Tethered se perdió en el espacio.



De arriba a abajo, Maurizio Cheli* (Mission Specialist) *y Umberto Guidoni* (Paiload Specialist)*, protagonistas de la misión Tethered Satellite System.

¿QUÉ PUEDE HACER EL SATÉLITE TETHERED?

Parece que sólo la fantasía puede poner límite a las aplicaciones del sistema transbordador-cable-satélite. Podría convertirse sucesivamente en un generador eléctrico, un observatorio privilegiado de la atmósfera, un ascensor espacial (para desplazar a lo largo del cable un pequeño laboratorio de microgravedad), un túnel del viento (haciendo volar modelos aerodinámicos en la alta atmósfera unidos al transbordador con cables de hasta 100 km de longitud), un sistema de lanzamiento de satélites, una gigantesca antena espacial, un elemento de servicio para la construcción de futuras estaciones permanentes...

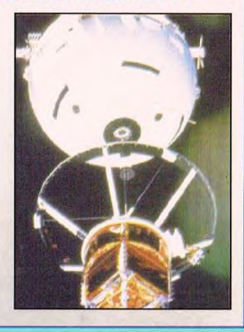


Imagen del Tethered tomada desde abajo.



EN EL PRÓXIMO NÚMERO

EL SISTEMA SOLAR

LAS MANCHAS SOLARES

ESTRELLAS Y GALAXIAS

EL GRUPO LOCAL

GUÍA DE LAS CONSTELACIONES

PALOMA-CINCEL

CÓMO FUNCIONA EL UNIVERSO

LA PROPAGACIÓN DEL CALOR

LA EXPLORACIÓN DEL ESPACIO

RAYOS SOLARES EN LUGAR DE VIENTO

EL UNIVERSO

ENCICLOPEDIA DE LA ASTRONOMÍA Y EL ESPACIO

28



9 788439 554219 10028

$ 3,90

PLANETA DeAGOSTINI



COMPOSICIÓN DE LA OBRA

Volumen 1	Fascículos 1	al	16
Volumen 2	Fascículos 17	al	32
Volumen 3	Fascículos 33	al	48
Volumen 4	Fascículos 49	al	64
Volumen 5	Fascículos 65	al	80

VENTA EN QUIOSCOS

Pida a su proveedor habitual que le reserve un ejemplar de EL UNIVERSO. Adquiriéndolo todas las semanas en el mismo punto de venta facilitará la distribución y obtendrá un mejor servicio.
Las tapas correspondientes a cada volumen se ponen a la venta con el fascículo que cierra el tomo. Con dicho fascículo se entregan las portadillas correspondientes.

Presidente: José Manuel Lara
Director General: Carlos Fernández
Director Editorial: Virgilio Ortega
Director General de Producción: Félix García
Coordinador General: Carles Dorico

© Editorial Planeta Argentina S.A.I.C.
Av. Independencia, 1668 - Capital Federal
Servicio de atención al cliente: Tel. (01) 482 - 0655 y 482 - 0657
Distribuye: Capital: Huesca-Sanabria,
Baigorri, 103, Capital Federal,
Interior: D.G.P., Alvarado, 2118, Capital Federal

© Editorial Planeta Mexicana, S.A. de C.V.
Av. Insurgentes Sur # 1162 - México D.F.
Servicio de atención al cliente: Tel. 575 13 48

© Editorial Planeta Colombiana, S.A.
Carrera, 68, n.º 25-55 - Santa Fé de Bogotá, D.C.
Servicio de atención al cliente: Tel. 9800 - 15315

© Editorial Planeta Chilena, S.A.I.C.
Olivares, 1229 - Santiago de Chile

ISBN Obra completa (con vídeo): 84-395-4148-1
Obra completa (sin vídeo): 84-395-4138-4
Fascículos (con vídeo): 84-395-4149-X
Fascículos (sin vídeo): 84-395-4139-2
Depósito legal: B-47.097-1997

Impresión: Cayfosa, Santa Perpètua de Mogoda, Barcelona
Impreso en España - Printed in Spain - Mayo 1998

Los editores se reservan el derecho de modificar el precio de venta de los componentes de la colección en el transcurso de la misma, si las circunstancias así lo exigieran.
Los editores garantizan la publicación de todos los fascículos que componen esta obra.

Fotografías: Lee Gibbons: cubierta, 116-117, 116ab., 117ar.; ESA/SPL: 107c.der.; E.T. Archive: 106ar.; Galaxy Picture Library: 101, 104, tercera de cubiertas; IGDA: 107ar.der.; Science Photo Library/Julian Baum: 106-107; Dr. Jeremy Burgess: 103 der.; Range: 111; Hugh Rowland: 110; Spectrum: 110, 111; US Naval Observatory: 112ar.izq.; Bristock-IFA: 114-115; BNSC/ESA: 118ab.; ESA: 118-119, 119ab., 120c.; Tony Stone Picture Library: 120ab.
Dibujos: Robin Carter/WLAA: 104-105, 117ab.; David A. Hardy: 102-103; Hugh Rowland: 105, 106ab., 120; Katz: 108-109; Sandra Russell/Black Hat: 112ar.; Julian Baum: 113; Farroxs: 116ar.; Robin Bottel: 115ab.; Spectrum Picture Library: 114ab.

PETICIÓN DE FASCÍCULOS ATRASADOS

Válido sólo para el territorio español y para no suscriptores.

Si desea recibir algún fascículo atrasado o tapas, rellene en LETRAS MAYÚSCULAS este boletín y envíelo a:
PLANETA-DeAGOSTINI, Apartado de Correos N.º 2.867 - 08080 Barcelona, o llame al Tel. **902 288 288***

DATOS PERSONALES:

APELLIDOS

NOMBRE

CALLE O PLAZA

N.º PISO PUERTA ESC.

CÓDIGO POSTAL POBLACIÓN

PROVINCIA EDAD

TELÉFONO PROFESIÓN

FIRMA (Imprescindible)

• Recibirá contrarreembolso, más gastos de envío todo el material que nos haya solicitado.

SOLICITUD:

EL UNIVERSO
ENCICLOPEDIA DE LA ASTRONOMÍA Y EL ESPACIO

Indique los números de los fascículos atrasados que desea recibir:

/ / / / / / / / /

/ / / / / / / / /

N.º de tapas que solicita: ____________

Indique si desea recibir la versión con vídeo o sin vídeo:

Con vídeo ☐ Sin vídeo ☐

• Planeta-DeAgostini mantendrá su servicio de petición de atrasados hasta un plazo máximo de 18 meses a partir de la fecha de venta de cada uno de los números que forman la colección.

LAS MANCHAS SOLARES

Observadas ya en la Antigüedad, sin que se descubriera su verdadera naturaleza, las manchas solares no son sólo «heridas» en la superficie del Sol. Estos objetos, testigos de fenómenos profundos que se producen en el interior de nuestra estrella y fuente de intensos campos magnéticos, todavía suscitan muchos interrogantes.



Las manchas solares que periódicamente se ven en el disco solar son uno de los fenómenos más llamativos de nuestra estrella. Pese a encontrarse en la fase más tranquila de su existencia, la de la fusión de hidrógeno en helio (que lo convierte en miembro de la secuencia principal en el diagrama de Hertzsprung-Russell), el Sol es en realidad un objeto muy vivo, dentro del cual se producen fenómenos todavía no del todo comprendidos.

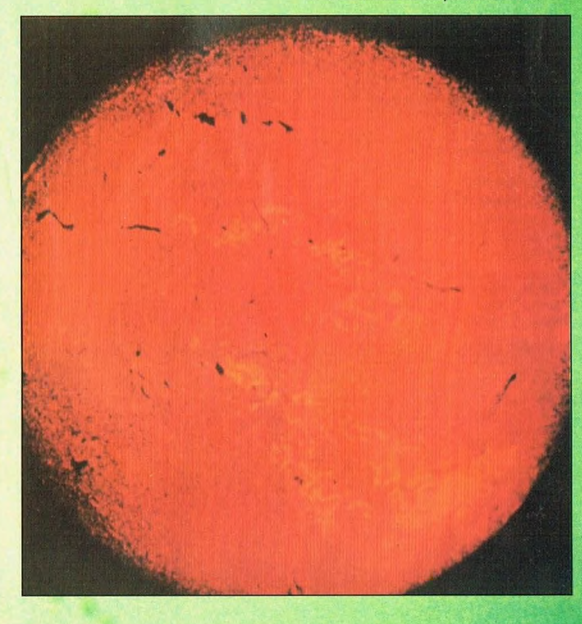
LAS OBSERVACIONES ANTIGUAS

Las manchas solares ya fueron observadas en la Antigüedad sin que se sospechara su verdadera naturaleza; incluso Kepler, en 1604, fue engañado por una de ellas, a la que confundió con el planeta Mercurio en tránsito sobre el disco solar. A partir de 165 a.C., un notable número de observaciones sobre las manchas solares constan en los anales chinos, que para los astrónomos que se ocupan de la historia de la disciplina constituyen una fuente inagotable de informaciones. Los antiguos astrónomos chinos comparaban las manchas con manzanas o monedas y a veces conseguían seguir la misma mancha durante varios días. También las crónicas japonesas y coreanas registran la observación de manchas solares. Pero la noticia más antigua de una mancha solar procede de Occidente, en el siglo IV a.C., y se atribuye a Teofrasto de Atenas, alumno de Aristóteles.

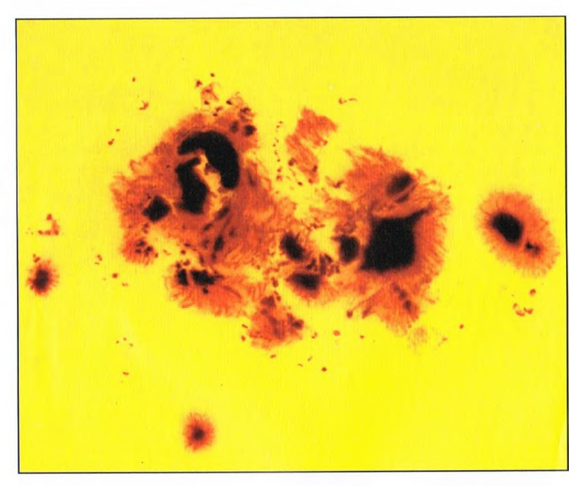
En tiempos más recientes fue Galileo Galilei quien redescubrió las manchas solares en el curso de su extraordinaria campaña de observación iniciada en 1609, cuando construyó su primer anteojo (un redescubrimiento cuya prioridad dio lugar a una larga controversia con el jesuita Christopher Sheiner). Entre otros factores,

En la imagen a toda página, la superficie solar, en la cual se destaca una mancha.

Abajo, el Sol es un objeto muy activo; en su interior se desarrollan intensos procesos en buena medida todavía poco conocidos.



A la derecha, detalle de un grupo de manchas solares, en las que se advierten claramente las zonas de sombra y de penumbra.



la observación de las manchas solares contribuyó a la crisis del modelo del universo según el cual las estrellas eran esferas perfectas e incorruptibles.

A partir de 1750 se llevaron a cabo observaciones sistemáticas fiables.

EL ASPECTO DE LAS MANCHAS

Las manchas solares tienen un aspecto oscuro, no porque sean negras sino porque son más frías que las zonas circundantes de la fotosfera, que es la superficie visible del Sol. Alrededor de la zona más oscura de la mancha, denominada sombra, hay un zona de luminosidad intermedia llamada penumbra. En la sombra, la temperatura es de unos 4.300-4.800 K, unos 1.000-1.500 K inferior a la de la fotosfera; en la penumbra, en cambio, las temperaturas son de aproximadamente 5.400-5.500 K. En la sombra la luminosidad es todavía el 32% de la de la fotosfera y en la penumbra el 80%. Por ello, ambas deberían aparecer muy brillantes. Lo que las hace parecer oscuras, sin embargo, es el contraste con la fotosfera.

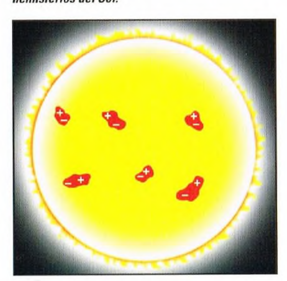
La disminución de la temperatura en las manchas parece ligada a los intensos campos magnéticos que se producen en estas regiones. Dichos campos magnéticos impiden el movimiento convectivo regular del material solar en estado de plasma que trata de llegar a la superficie.

GEORGE HALE Y LAS MANCHAS SOLARES

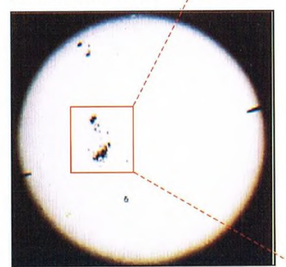
Fue George Ellery Hale quien en 1908 descubrió que las manchas solares son la sede de intensos campos magnéticos. Nacido en Chicago en 1868, Hale era director del observatorio de Monte Wilson, en California, donde operaba entonces el mayor telescopio del mundo. Hale también es conocidopor haber inventado en 1889 el espectroheliógrafo, un instrumento utilizado para el estudio de la superficie del Sol; a su memoria está dedicado además el famosísimo telescopio de 5 m de diámetro que se encuentra en aquel observatorio. Con el nombre de Hale Observatories se designa el conjunto formado por los observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar, que operaron juntos durante más de 30 años, desde 1948 (año de la fundación de Monte Palomar) a 1980.

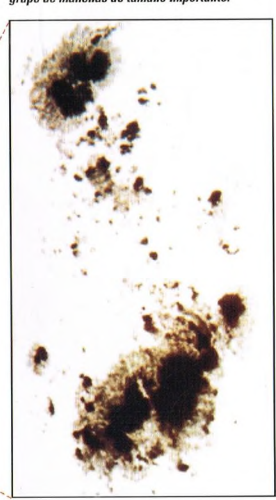
Las manchas solares pueden tener un tamaño realmente notable, desde 7.000 hasta 50.000 km, hasta el punto de poder observarse a simple vista, siempre, naturalmente, que se proteja la vista con filtros.

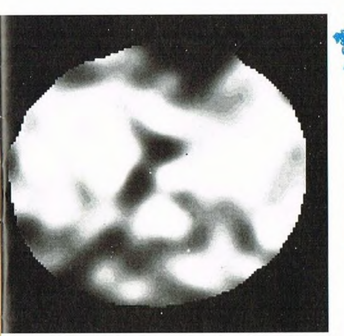
Abajo, en el dibujo se muestra la polaridad de los grupos de manchas que se forman en los dos hemisferios del Sol.



Abajo y a la izquierda, aumento de un complejo grupo de manchas de tamaño importante.







Como el Sol, también la gigante roja Betelgeuse presenta grupos de manchas.

OBSERVAR LAS MANCHAS SOLARES

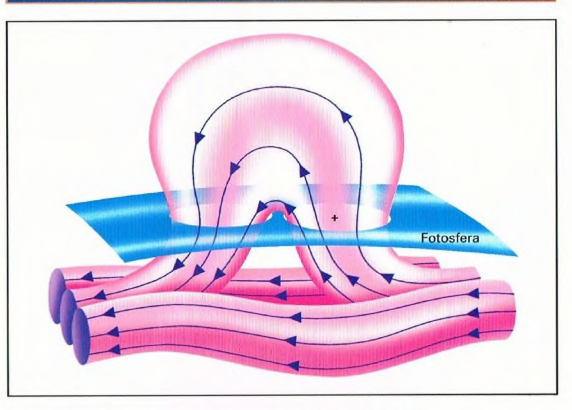
La observación de las manchas solares está al alcance de cualquier instrumento de aficionado; en algunos casos son visibles incluso a simple vista. Es importante, naturalmente, protegerse los ojos de la intensa luminosidad de nuestra estrella, que podría causar graves daños a la vista. Se utilizan a tal fin filtros adecuados que se aplican al objetivo de los telescopios; menos seguros son los que se enroscan a los oculares, porque a menudo son dañados por el calor.
Otra técnica de observación de las manchas es la llamada de proyección, en la cual la imagen del disco solar suministrada por un telescopio, en vez de mirarse directamente a través del ocular, se proyecta sobre una pantalla blanca. Así se evitan los riesgos de la observación directa y se ofrece a más personas la posibilidad de realizar simultáneamente la observación.

Las manchas pueden aparecer aisladas, pero generalmente lo hacen por grupos.

FORMACIÓN Y EVOLUCIÓN DE LAS MANCHAS

La observación continua del Sol, que hoy se efectúa con telecámaras que trabajan ininterrumpidamente para poder detectar fenómenos imprevistos, ha permitido a los astrónomos reconstruir la evolución de las manchas solares.

Todo comienza cuando, en un cierto punto de la fotosfera, empieza a formarse una región más oscura, de varios miles de kilómetros de diámetro, llamada poro; la mayor parte de estos poros se disuelven en aproximadamente un día. Algunos, en cambio, se dilatan hasta adoptar las características de una mancha o bien se rodean de una modesta penumbra (éste es el requisito que distingue un poro de una mancha) y adquieren un tamaño notable. La vida media de una mancha es de un par de semanas, durante las cuales ésta evoluciona, con variaciones continuas de forma y tamaño. Pero en general, como se ha dicho, las manchas tienden a formarse por pares o grupos, los cuales pueden tener una vida media de hasta tres meses. Las manchas, además, se mueven por la superficie del Sol a causa de un movimiento propio o debido a que el Sol tiene una rotación no uniforme. Al no ser un cuerpo rígido, el Sol gira más deprisa en las zonas próximas al ecuador (donde el período de rotación es de unos 25 días) que en las regiones polares.



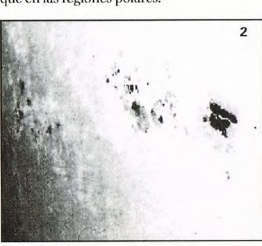
Arriba, esquema del campo magnético en la región que rodea algunas manchas.

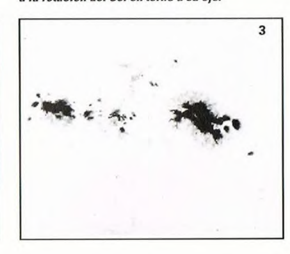
EL CICLO SOLAR

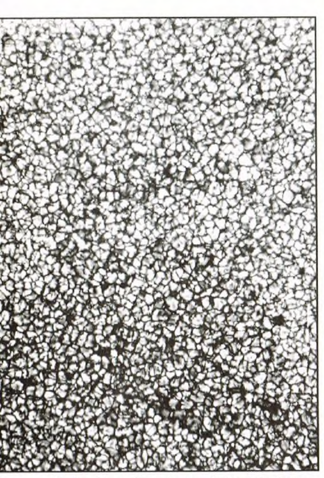
Desde comienzos del siglo XVIII se sabe que la intensidad y la frecuencia de las manchas solares siguen un proceso cíclico que dura unos 11 años. Esto significa que durante dicho período las manchas solares presentes en el disco del Sol aumentan hasta alcanzar un máximo y luego disminuyen, regresando

Abajo, evolución de algunas manchas solares en pocos días. El movimiento se debe a la rotación del Sol en torno a su eje.









Arriba, fotografía de la granulación fotosférica. Las dimensiones de los granos son del orden de miles de kilómetros.

a los niveles iniciales. La duración media de un ciclo es de 11,7 años, pero un ciclo individual puede durar entre 7 y 15 años; además, también el número máximo de manchas de cada ciclo puede variar mucho.

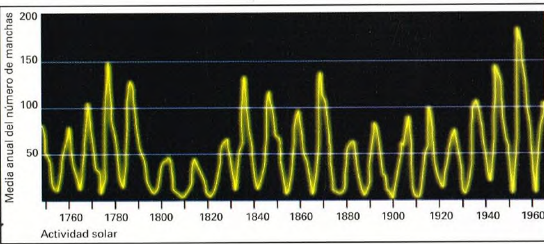
En la fase de mínimo el Sol se presenta a menudo, durante largos períodos de tiempo (días o semanas), sin huellas de manchas; en la fase de máximo, en cambio, se pueden observar una o dos decenas de grupos además de manchas aisladas. Los últimos máximos del ciclo tuvieron lugar en los años 1968, 1979 y 1990.

Dado que una mancha tiene una vida máxima de unos pocos meses, está claro que el ciclo undecenal es el signo de procesos profundos y de larga duración que tienen lugar en el centro del Sol y no es una característica de las propias manchas. Aunque todavía no del todo comprendido, el ciclo solar parece el resultado de la interacción entre el campo magnético del Sol y la región convectiva presente en las capas más externas.

INTENSOS CAMPOS MAGNÉTICOS

Las manchas solares son sede de intensos campos magnéticos. Una mancha típica tiene un campo de intensidad igual a 0,25 teslas (la tesla es la unidad de medida que se utiliza para esta magnitud física); piénsese, a modo de comparación, que el campo magnético terrestre tiene una intensidad inferior a 0,0001 tesla.

Además, las manchas presentan la característica de tener campos magnéticos que siguen regularidades muy precisas (este descubrimiento de 1919 también se debe a Hale y sus colaboradores). Si, por ejemplo, se forman un par de manchas en el hemisferio norte del Sol, la que va delante, en el sentido de rotación del Sol, suelé tener



A la izquierda, en el gráfico se ve el carácter cíclico de la actividad solar en el curso de dos siglos.

MIRANDO EL SOL

La observación de las manchas solares tiene un origen muy antiguo, pues los grandes grupos son observables incluso a simple vista. Obviamente, hay que adoptar las necesarias precauciones para proteger la vista de la intensa radiación procedente de nuestra estrella. Contra lo que cabría pensar, las gafas de sol y las películas fotográficas negras no son suficientes; hay que utilizar filtros adecuados.

Arriba, el dibujo ilustra la evolución en el tiempo de un característico complejo de manchas.

una polaridad opuesta a la que va detrás; en el otro hemisferio los campos magnéticos están invertidos respecto a los anteriores. Cuando acaba un ciclo y comienza otro, las polaridades de ambos hemisferios se invierten. Un ciclo solar completo, que comprenda también esta inversión de polaridades magnéticas, dura 22 años.

Además, las manchas tienden a aparecer simultáneamente en los dos hemisferios a latitudes simétricas respecto al ecuador. Estas regiones de formación de manchas se desplazan de unos 45° hasta unos 5° en el curso de un ciclo.

SOL ACTIVO Y SOL EN REPOSO

Hay constancia histórica de períodos intermitentes, pero de larga duración, en los cuales la actividad del ciclo solar parece desaparecer; en tales períodos el Sol permanece en un estado de mínimo sin rastros de manchas. El período más reciente en el cual se ha dado esta situación se llama Mínimo de Maunder: comenzó en torno a 1630 y duró unos 75 años.

Se habla en general de «Sol en reposo» cuando muestra escasez de manchas y otras manifestaciones; se habla, en cambio, de «Sol activo» cuando hay gran actividad, ya sea en forma de manchas y fáculas (regiones más brillantes que el resto de la fotosfera) que se presentan cerca de los bordes del Sol, ya sea de protuberancias. Estas fases de máxima actividad también se advierten en la Tierra, pues perturban las transmisiones de radio y producen a menudo las fascinantes auroras polares.

Arriba, las manchas solares no siempre están presentes. Pueden haber períodos de Sol en reposo, durante los cuales están casi completamente ausentes.

EL NÚMERO DE WOLF

Wolf y Wolfer, dos astrónomos suizos del siglo pasado, idearon un sistema para expresar la intensidad de la actividad solar a través del número de manchas observables independientemente del observador y del instrumento utilizado. El número que expresa esta medida, llamado número de Wolf e indicado por la letra *W*, se calcula a través de la fórmula siguiente:
$W = k\,(10\,G + T)$,
donde *G* es el número de grupos de manchas, *T* el número total de manchas contenidas en los grupos (incluidas las manchas aisladas) y *k* un coeficiente que varía con el instrumento, el observador y la turbulencia atmosférica. Para Wolf, que disponía de un anteojo de 75 mm, *k* era igual a 1.
Por ejemplo, el máximo del ciclo solar de 1816 correspondía a un número de Wolf igual a 48,7, mientras que el máximo de 1957 correspondía a un valor de 210,3.

EL GRUPO LOCAL

Nuestra Galaxia, la Vía Láctea, forma parte de un pequeño grupo de galaxias llamado Grupo Local. Este conjunto, que hoy parece estable y ligado gravitacionalmente, tal vez está destinado a fundirse algún día con el gran cúmulo de Virgo, que se encuentra en el centro del Supercúmulo Local de galaxias.



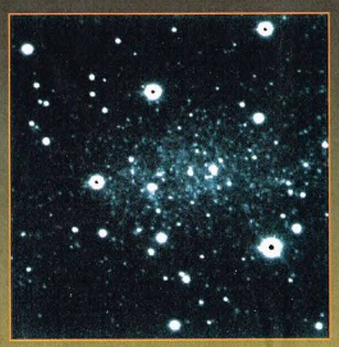
Las únicas galaxias exteriores a nuestra Vía Láctea que se pueden percibir a simple vista son la galaxia de Andrómeda, en el cielo boreal, y las dos Nubes de Magallanes, en el cielo austral. Las tres forman parte de un gran sistema cohesionado por la gravedad y llamado Grupo Local. Las galaxias que forman parte de él son unas decenas (tal vez 30 o 40) y comparten el destino de orbitar a la distancia de 40-60 millones de años luz del gran cúmulo de galaxias de Virgo, en el cual tal vez serán englobadas un día.

UNA FAMILIA DE 30-40 ELEMENTOS

Gracias a su proximidad a la Vía Láctea, las galaxias del Grupo Local forman un posible laboratorio observacional único. La diversidad de objetos que se pueden observar es la misma que los telescopios más potentes encuentran en los ángulos más recónditos del cosmos. Pero sólo en el Grupo Local se pueden observar con detalle las estrellas que forman estas galaxias para estudiar su composición.

Abajo, en el subgrupo de la Vía Láctea la galaxia más lejana descubierta es Leo I, una galaxia enana esferoidal. Se trata, probablemente, del satélite más alejado de nuestra Galaxia, con una distancia de 600.000 años luz. La foto, obtenida por David Malin con el Anglo-Australian Telescope, muestra Leo I resuelta en sus componentes estelares. Un análisis de los colores de las estrellas ha mostrado que muchas de ellas tienen una edad de 3.000 millones de años; se trata, por tanto, de estrellas muy jóvenes en comparación con las de las demás galaxias.





A la izquierda, el grupo, o subgrupo, de la Vía Láctea contiene muchas galaxias enanas. Durante mucho tiempo los astrónomos creyeron que las Nubes de Magallanes eran las galaxias más próximas, hasta el punto de creer que eran satélites de nuestra Galaxia. El récord de proximidad lo detentaba Sag DEG, una galaxia elíptica enana de Sagitario (en inglés Sagittarius Dwarf Elliptical Galaxy*), que dista 80.000 años luz de nosotros, contra los casi 200.000 años luz de las Nubes de Magallanes. Su descubrimiento no tuvo lugar hasta 1994, sobre todo debido a su baja luminosidad, y también porque su tamaño aparente es suficientemente grande como para englobar en el campo visual muchas estrellas de la Vía Láctea, lo cual dificultaba su identificación. La foto fue obtenida por Oksanen con el telescopio NOT de 2,5 m de diámetro. Sin embargo, en 1997 se descubrió una nueva galaxia, llamada Antlia, todavía más cercana.*

Más compleja, en cambio, es la elección de un criterio para decidir cuándo una galaxia observada con un telescopio forma parte de nuestro Grupo Local. Si se decide considerar todas las galaxias que se encuentran a una distancia inferior a una fijada, por ejemplo 4 millones de años luz, entonces se encuentran 30 miembros. Si, en cambio, se considera la velocidad con que las galaxias se alejan o aproximan a la nuestra, entonces el grupo se vuelve un poco mayor, ya que incluye objetos más lejanos. Además, pese a la proximidad, a veces es difícil ver las galaxias más débiles: todavía hoy, nuevas observaciones permiten descubrir nuevas galaxias enanas pertenecientes al Grupo Local.

GALAXIAS ESPIRALES Y ELÍPTICAS

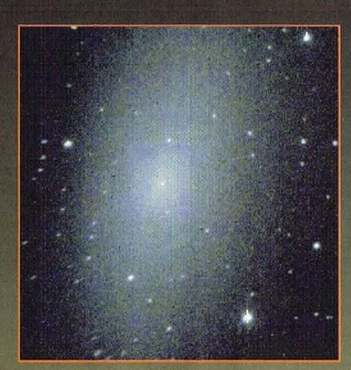
Los miembros más grandes y luminosos del Grupo Local son precisamente nuestra Galaxia, la Vía Láctea, y los dos objetos de Messier M31 y M33. Nuestra Galaxia tiene un diámetro de unos 100.000 años luz, mientras que la galaxia de Andrómeda (M31) es mayor, con un diámetro de unos 200.000 años luz. Ambas son clasificables como galaxias espirales, si bien la Vía Láctea tiene los brazos un poco más pronunciados.

Del mismo tipo, aunque con un tamaño más modesto, es la nebulosa del Triángulo (M33), con un diámetro de unos 45.000 años luz.

En torno a las dos galaxias principales, la Vía Láctea y M31, gravitan decenas de galaxias más pequeñas, enanas irregulares o elípticas que forman subgrupos. En las proximidades de la Vía Láctea se encuentran las dos Nubes de Magallanes: la pequeña, llamada SMC (Small Magellanic Cloud), y la mayor, llamada LMC (Large Magellanic Cloud), a la distancia de casi 200.000 años luz. Luego están las galaxias enanas de *Sagittarius, Ursa Minor, Draco, Sextans, Sculptor, Fornax*, Leo I y Leo II. *Sculptor, Draco* y *Ursa Minor*, pequeñas galaxias esferoidales, son de hecho satélites de la nuestra, como las Nubes de Magallanes.

El grupo de Andrómeda contiene las galaxias brillantes M32 y M110 (dos galaxias elípticas que orbitan como satélites alrededor de la galaxia de Andrómeda), NGC 147 y NGC 185, y los sistemas de Andrómeda I, II, III y probablemente IV. La galaxia M33, como se ha dicho, es más pequeña y no se puede descartar la posibilidad de que esté ligada al grupo de Andrómeda, si bien también ella tiene una pequeña compañera, LGS 3.

Es interesante constatar que, aparte de la Vía Láctea, M31 y M32, que son galaxias espirales, todos los demás miembros del Grupo Local son enanas irregulares o elípticas, que orbitan alrededor de las grandes espirales. Este tipo de distribución parece similar a la que se encuentra en otros tipos de galaxias.



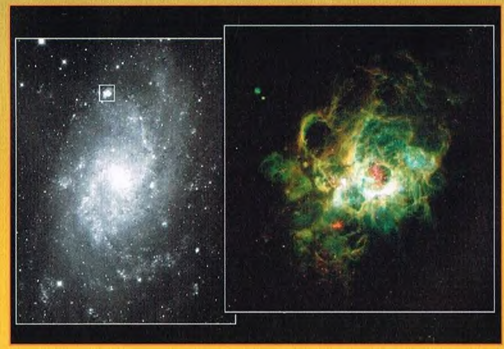
A la izquierda, NGC 205 se conoce también bajo el nombre de M110, como la bautizó en los años sesenta el astrónomo estadounidense Jones para completar el catálogo de Messier. La galaxia elíptica, en efecto, estaba presente en los apuntes y dibujos del astrónomo francés, que, sin embargo, no la había incluido en el famoso catálogo que publicó. Se trata de una de las dos galaxias compañeras de Andrómeda (la otra es M32), que junto con otras galaxias más pequeñas forman el subgrupo de Andrómeda. La foto (tomada por Bill Keel, del Lowell Observatory, con el telescopio Hall de 1,1 m) muestra la peculiaridad de la galaxia. No es habitual, en efecto, que las galaxias elípticas contengan regiones de polvo (apenas visibles en la foto como dos manchas más oscuras en dirección de las agujas del reloj apuntando a las 7 y a las 11) y muestren signos de formación estelar reciente.

GALAXIAS DISPERSAS

Hay otras muchas galaxias menores ligadas gravitacionalmente al Grupo Local que, sin embargo, no forman parte de ninguno de los mayores subgrupos. Se pueden individualizar otros conjuntos más o menos grandes, que tal vez en el pasado estuvieron más ligados al nuestro de lo que están

Abajo, la galaxia espiral del Triángulo M33 es la tercera (hasta ahora conocida) en la clasificación de las más brillantes del Grupo Local, tras Andrómeda y la Vía Láctea. Su tamaño es aproximadamente la mitad del de nuestra Galaxia y su morfología la clasifica como Scd, una galaxia espiral de tipo avanzado, con los brazos muy pronunciados y un núcleo relativamente pequeño. En los brazos espirales todavía se produce formación de estrellas a una tasa notable; así lo atestiguan las numerosas regiones H II gigantes, donde el gas hidrógeno está iluminado por las estrellas recién formadas. Éstas son bien visibles en la foto obtenida durante la misión ASTRO-1 del transbordador espacial con el telescopio de ultravioletas UIT (foto de abajo). En rojo se representa la luz visible y en azul la emisión en banda del ultravioleta procedente de numerosas regiones H II. Una de estas regiones tiene incluso un número en el catálogo NGC; se trata de NGC 604, ya anotada en el catálogo de William Herschel. Tiene un tamaño de unos 1.500 años luz y es una de las mayores conocidas. La fotografía de abajo a la derecha muestra, a la izquierda, la galaxia M33 entera tomada desde la Tierra, y a la derecha, NGC 604 vista desde el Space Telescope. Un cúmulo de más de 200 estrellas supermasivas (entre 15 y 60 veces mayores que el Sol) emite suficiente luz como para excitar los átomos de hidrógeno de la nebulosa y por lo tanto hacer visible la estructura del gas.







Arriba, foto del centro de nuestra Galaxia, miembro del Grupo Local, tomada por el satélite COBE en el infrarrojo (entre 12.000 y 35.000 angstroms). En la proyección de Mollweide se cubren 60° de longitud y 20° de latitud. Se puede apreciar la ligera asimetría del núcleo galáctico.

ahora: el grupo de Maffei 1 (que también contiene Maffei 2 e IC 342); el grupo de M81, una gran galaxia espiral; el grupo de M83 y el grupo del Polo Sur (visible en la dirección del polo Sur galáctico).

El obstáculo mayor para poder efectuar una lista completa de las galaxias miembros del grupo es la presencia de nuestra Vía Láctea, que oscurece una buena parte del cielo. El polvo que impide observar directamente el centro galáctico impide también ver más allá de la banda de la Vía Láctea. Sin embargo, recientes imágenes en las proximidades del plano galáctico han permitido un continuo descubrimiento de nuevas galaxias vecinas que hay que adjuntar a la lista del Grupo Local.

LA MATERIA OSCURA

Las fotografías de los miembros del Grupo Local, obtenidas con los grandes telescopios, han llevado a la clasificación de muchas categorías de objetos que pueblan estas galaxias: de los cúmulos globulares a las regiones H II, enormes nubes gaseosas sede de una continua formación de nuevas estrellas.

Recientemente se han descubierto las galaxias Dwingeloo 1 y Dwingeloo 2. Sus coordenadas son próximas a la dirección de ascensión recta de 1 hora y de +60° de declinación. Las estrellas de nuestra Vía Láctea, que dominan el campo en esta dirección, han impedido durante mucho tiempo ver estas galaxias. El grupo del observatorio de Greenwich, con el telescopio Isaac Newton de las islas Canarias, ha organizado un proyecto para la búsqueda de galaxias oscurecidas por la nuestra. La Dwingeloo 1 podría formar parte del Grupo Local, aunque está en sus extremos confines.

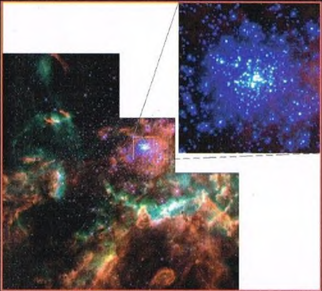


IC 10
And. III
And. I
NGC 6622
Piscis
IC 1613
WLM
IC 5152

NGC 185
Leo II
Leo I
NGC 205
Draco
M31
M32
Sextans I
And. II
Vía Láctea
Gran Nube de Magallanes
M33
Carina
Sculptor
Pequeña Nube de Magallanes
Ursa Minor
Fornax

GALAXIAS AGRUPADAS Y GALAXIAS AISLADAS

Las galaxias manifiestan la tendencia a reunirse en grupos, y los grupos en cúmulos. Sin embargo, hay un gran número de galaxias, llamadas «de campo», esparcidas por la bóveda celeste, que no parecen ligadas a otras.



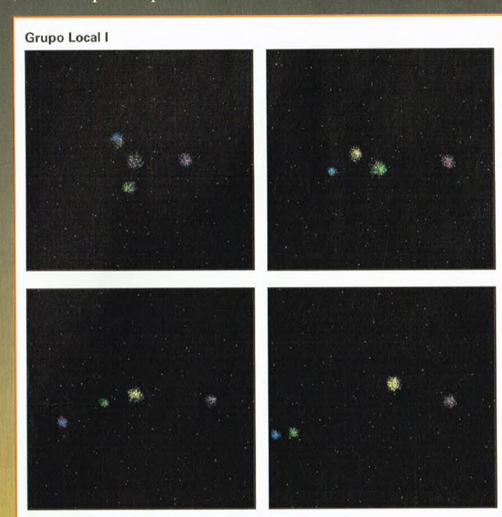
Arriba, en el recuadro, una ampliación de una región H II gigante, la misma que vemos en la imagen mayor. Esta región se extiende alrededor de un denso cúmulo globular. La porción de cielo encuadrada pertenece a la llamada Gran Nube de Magallanes.

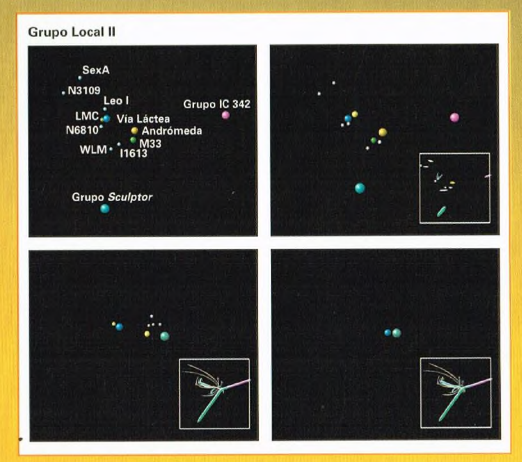
También la cosmología, la rama de la astrofísica que estudia la estructura y la evolución del universo en su conjunto, tiene en el Grupo Local un laboratorio de excepción. Las curvas de rotación de las galaxias son los instrumentos que por primera vez han permitido descubrir la presencia de masa oscura, la porción de materia que no emite luz visible pero que muestra los mismos efectos gravitacionales que la masa constitutiva de las estrellas normales. Se trata de gráficas donde se representa la velocidad de revolución de las estrellas alrededor del centro de una galaxia (medida con espectrógrafos de gran precisión) en función de su distancia al centro. Este estudio, realizado principalmente para las galaxias espirales como Andrómeda o nuestra Vía Láctea, ha revelado la existencia de un halo de masa invisible en las regiones más externas.

Además, recientemente, el astrónomo estadounidense Aaronson ha observado que también las galaxias elípticas enanas (o esferoidales) muestran la presencia de materia oscura, aunque aparentemente concentrada en las regiones centrales del núcleo. El fenómeno de la masa oscura adquiere así un carácter general, pues se ha detectado también en las vastas regiones

A la izquierda, un mapa tridimensional que muestra todo el Grupo Local, con la excepción de los miembros más externos. Se han representado de distinto color las galaxias elípticas (rojas), las espirales (amarillas) y las irregulares (azules).

aparentemente vacías que se encuentran entre unas galaxias y otras dentro de los varios cúmulos. Sobre la base de estas observaciones parece incluso que el universo se compone en un 90% (o tal vez un 99%) de materia invisible de una naturaleza física todavía desconocida por los expertos.

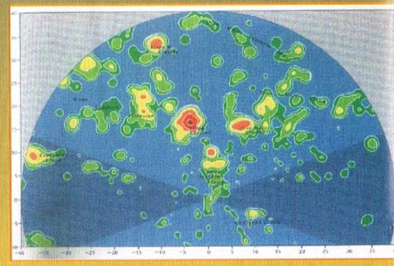


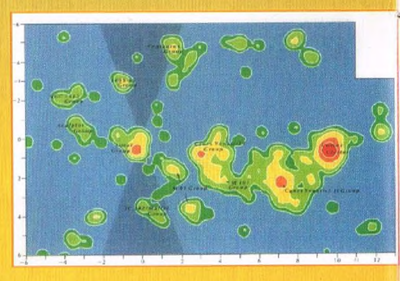


Al lado, evolución probable del Grupo Local (I). Simulaciones numéricas por ordenador han permitido a un grupo de científicos estadounidenses y finlandeses (Valtonen, Byrd, Innanen y Mc Call) reconstruir su historia pasada partiendo de las posiciones y las velocidades de los miembros del Grupo Local medidas hoy. Estas cuatro imágenes forman parte de una serie que muestra cómo las dos galaxias IC 342 y Maffei 1 (las dos nebulosas más pequeñas de las imágenes) han sido lanzadas lejos por la atracción gravitatoria con la galaxia de Andrómeda (en amarillo) y cómo la propia galaxia de Andrómeda es el fruto de la fusión de tres galaxias más pequeñas. La posición final de Andrómeda se encuentra en dirección de nuestra Vía Láctea (en rosa, a la derecha de las imágenes) pero su destino no parece ser el de encontrarse con nosotros.

A la izquierda abajo, evolución del Grupo Local (II). Las simulaciones teóricas han permitido conjeturar una historia global del grupo. En la imagen se incluyen todas las galaxias y no sólo se ve cómo los dos grupos menores de Maffei 1 (IC 342) y Sculptor *fueron expulsados en tiempos recientes, sino también cómo, en tiempos más remotos, el grupo tuvo su origen en un «Big Bang» local.*

*Abajo, en el mapa del Atlas de Tully y Fisher (*Nearby Galaxies Atlas*, Cambridge University Press, 1987) se muestra en una escala de colores la densidad de las galaxias en las proximidades de la nuestra. Se advierten los grupos Maffei (IC 342), M81 y el más lejano Coma I (hacia la derecha). En el segundo mapa, en la dirección de Coma I se ve más lejos el cúmulo de Virgo (Virgo* Cluster*). Se trata del verdadero centro del supercúmulo Local.*





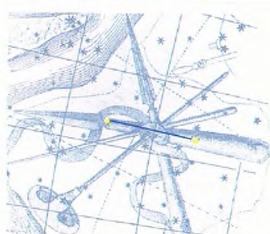
CATÁLOGO DE LAS GALAXIAS PERTENECIENTES AL GRUPO LOCAL

NOMBRE	ASCENSIÓN RECTA (h y mn)	DECLINACIÓN (grados)	TIPO SEGÚN HUBBLE	MAGNITUD APARENTE	DISTANCIA (millones de años luz)	DIÁMETRO (miles de años luz)
Vía Láctea	–	–	Sb-Sbc	(M = -20,5)	–	100
WLM	0 02,0	-15 28	Irr	11,3	2,0	7
IC 10	0 20,3	+59 19	Irr	11,7	4,0	6
NGC 147	0 33,1	+48 31	E5	10,4	2,2	10
Andrómeda III	0 35,3	+36 31	E5	-	2,2	3
NGC 185	0 38,9	+48 20	E3	10,1	2,2	6
NGC 205	0 40,3	+41 41	E5	8,6	2,2	10
M32	0 42,7	+40 52	E2	9,0	2,2	5
M31	0 42,7	+41 16	Sb	4,4	2,2	200
Andrómeda I	0 45,7	+38 00	E3	14,4	2,2	2
SMC	0 52,7	-72 54	Irr	2,8	0,3	0,5
Sculptor	0 59,9	-33 42	E3	9,1	0,2	1
Piscis	1 03,7	+22 03	Irr	10,0	2,5	12
IC 1613	1 04,9	+2 07	Irr	15,5	3,0	0,5
Andrómeda II	1 16,3	+33 25	E2	–	2,2	2
M33	1 33,9	+30 39	Sc	6,3	2,5	45
Fornax	2 39,6	-34 31	E3	8,5	0,5	3
LMC	5 23,9	-69 47	Irr	0,6	0,2	20
Carina	6 41,7	-50 58	E3	11,8	0,6	0,5
Leo A	9 59,4	+30 45	Irr	12,7	5,0	7
Leo I	10 08,5	+12 18	E3	11,8	0,6	1
Sextans I	10 12,8	-1 41	E	–	0,3	3
Leo II	11 13,5	+22 10	E0	12,3	0,6	0,5
GR 8	12 59,2	+14 09	Irr	14,6	4,0	0,2
Ursa Minor	15 08,8	+67 07	E5	–	0,3	1
Draco	17 20,2	+57 55	E3	–	0,3	0,5
Sag DIG	19 30,0	-17 41	Irr	15,6	4,0	5
NGC 6822	19 44,9	-14 46	Irr	9,3	1,7	8
DDO 210	20 47,0	-12 51	Irr	15,3	5,0	4
IC 5152	22 02,9	-51 17	Irr	11,7	2,0	5
Tucana	22 41,9	-64 25	–	–	–	–
Pegasus	23 28,6	+14 46	Irr	12,4	5,0	8
Sag DEG	18 55	-30 30	–	–	0,08	–

El catálogo se limita a las galaxias que con seguridad son miembros del grupo y por lo tanto es incompleto, todavía hoy se van descubriendo nuevas galaxias. Los datos que faltan en la tabla no se conocen con precisión.

PALOMA – CINCEL





La Paloma (arriba) y el Cincel (abajo) no contienen objetos brillantes y no son fácilmente distinguibles.

La Paloma (Columba) _y el Cincel_ (Caelum) _son dos constelaciones poco llamativas del cielo meridional._



Las dos constelaciones del Cincel y de la Paloma tienen distintos orígenes: mientras que la primera fue inventada por el abate Lacaille, en su celo por llenar el cielo meridional con todo tipo de asterismos, la segunda aparece por vez primera en el atlas de Bayer de 1603, pero ya Plancio la introdujo en 1592.

CÓMO LOCALIZAR LA CONSTELACIÓN

La Paloma y el Cincel son colindantes, pero para identificarlas es más fácil considerar sólo la primera, dado que contiene estrellas relativamente luminosas.

Partiendo de Sirio, la estrella más brillante de toda la bóveda celeste, se baja unos 20° hacia el suroeste teniendo en cuenta que cuando se observa el cielo mirando en dirección sur el occidente queda a la derecha. Así se llega cerca de Alfa *Columbae*, la estrella más luminosa de las dos constelaciones.

ESTRELLAS PRINCIPALES

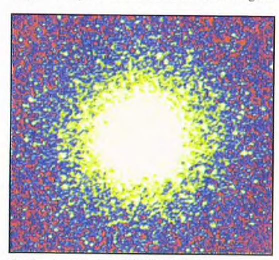
La Paloma y el Cincel contienen pocas estrellas relativamente brillantes.

Como ya se ha dicho, la más luminosa es Alfa, en la constelación de la Paloma, que brilla con magnitud 2,6. Se trata de una estrella de luz azul que dista de nosotros unos 120 años luz.

Beta (magnitud 3,1), segunda en luminosidad, también pertenece a la Paloma; es más fría que Alfa, por lo que parece tener un color amarillento.

El Cincel tiene estrellas de magnitud 4 o superior y la estrella principal de la constelación es Alfa *Caeli* (magnitud 4,5), que brilla con luz blanca.

Mu *Columbae* (magnitud 5,2) es, al igual que 53 *Arietis*, una estrella en rápido desplazamiento; su movimiento propio es de 0,025'' anuales, un valor no muy grande, pero la distancia de la estrella a nosotros corresponde a una velocidad en el espacio sideral de 120 km/s. Esta estrella nació de la nebulosa de Orión, pero se ha ido alejando rápidamente de su zona de origen.



El cúmulo globular NGC 1851 de la Paloma es el objeto más interesante de la constelación.

LOS MITOS Y LAS ESTRELLAS

LA PALOMA Y EL CINCEL

Mientras que la constelación del Cincel no está ligada a ninguna leyenda, la de la Paloma, pese a su introducción tardía respecto a las constelaciones de la época clásica, puede asociarse a dos historias. Su situación en las cercanías de la antigua constelación de la Nave Argos, ahora desmembrada en constelaciones más pequeñas, la identifica con la paloma mandada por los argonautas para indicarles un trayecto seguro.

Una segunda posibilidad, debida al hecho de que la nave Argos fue identificada con el arca de Noé, remite a la paloma que fue enviada en busca de tierra firme y que volvió llevando en el pico una rama de olivo. Históricamente, se trató de «cristianizar» la bóveda celeste, asociando a las constelaciones figuras del mundo cristiano, en general santos o personajes bíblicos, sustrayendo el cielo al paganismo. Sin embargo, esta operación no tuvo éxito y todavía hoy las constelaciones más antiguas siguen ancladas a héroes y leyendas de la mitología clásica.

DÓNDE BUSCARLA

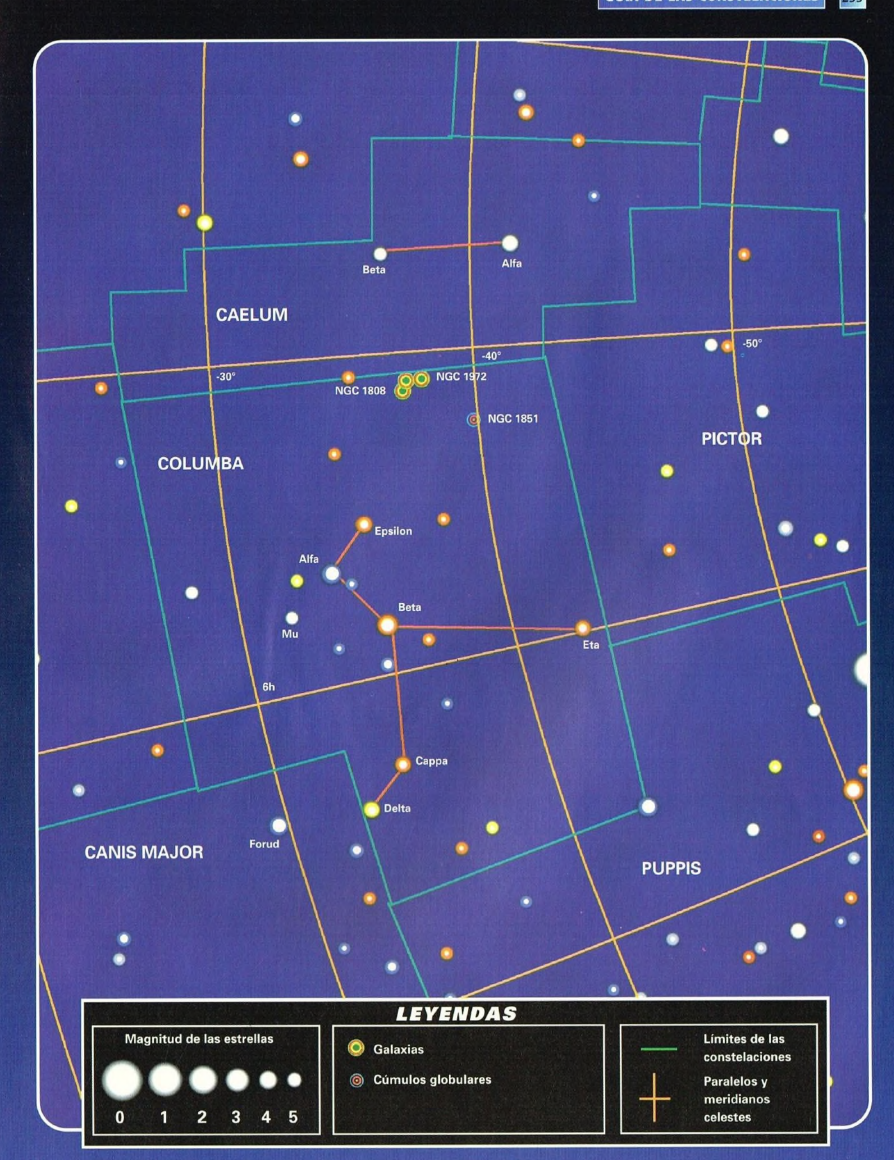
LA PALOMA Y EL CINCEL

La constelación de la Paloma abarca una región del cielo comprendida entre 27° S y 43° S de declinación, y entre 5 horas 5 minutos y 6 horas 40 minutos de ascensión recta. Es íntegramente observable todo el año desde latitudes más al sur que 63° S y parte del año desde las regiones de latitud comprendida entre 63° S y 47° N. Por encima de 47° N nunca es enteramente observable.

La constelación del Cincel abarca una región del cielo comprendida entre 27° S y 49° S de declinación, y entre 4 horas 20 minutos y 5 horas 5 minutos de ascensión recta. Es íntegramente observable todo el año desde latitudes más al sur que 63° S y parte del año desde las regiones de latitud comprendida entre 63° S y 41° N. Por encima de 41° N nunca es íntegramente visible.

OBJETOS NOTABLES

NGC 1851, de la Paloma, es un cúmulo globular de octava magnitud; en los instrumentos de aficionados aparece, al igual que otros objetos similares, como una mancha luminosa redondeada de aspecto difuso con un diámetro aparente de 11'. La constelación de la Paloma presenta dentro de sus límites una galaxia de magnitud 13, difícil de observar con telescopios de aficionados.


Beta
Alfa
CAELUM
-30°
-40°
-50°
NGC 1808
NGC 1972
NGC 1851
PICTOR
COLUMBA
Epsilon
Alfa
Beta
Mu
Eta
6h
Cappa
Delta
Forud
CANIS MAJOR
PUPPIS
LEYENDAS
Magnitud de las estrellas
0 1 2 3 4 5
Galaxias
Cúmulos globulares
Límites de las constelaciones
Paralelos y meridianos celestes

LA PROPAGACIÓN DEL CALOR

La sensación de calor procede del sentido del tacto; los receptores nerviosos de nuestra piel nos dicen cuándo ésta se calienta, ya sea porque está en contacto con un cuerpo caliente o porque recibe los rayos solares. Estos simples experimentos nos dan importantes indicios sobre cómo puede propagarse el calor.



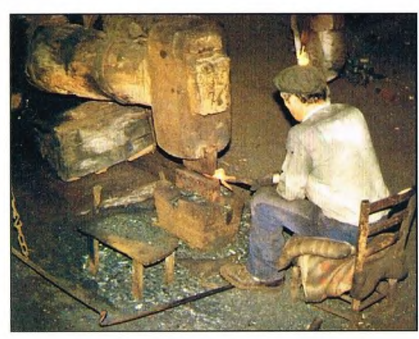
¿Cómo se propaga el calor? Se sabe que es una forma de energía, pasa de los cuerpos más calientes a los más fríos. Esto hizo creer en la Antigüedad que se trataba en realidad de un fluido, llamado calórico, que se trasladaba de cuerpos con temperatura mayor a otros con menor temperatura. Sólo a raíz de los experimentos del conde Rumford en el siglo XVIII se demostró la posibilidad de producir ilimitadamente calor por rozamiento.

Por tanto, no podía existir un fluido como el que se había dado por supuesto anteriormente, ya que era posible lograr una generación espontánea casi infinita de calor, mientras que un fluido sólo habría podido caber en cantidad limitada en un determinado cuerpo. Más tarde, J.P. Joule midió cuantitativamente la correspondencia entre trabajo mecánico, y por tanto energía, y calor por medio de un molinillo llamado precisamente molinillo de Joule. Más tarde se desarrollaron los estudios sobre termodinámica debido a la necesidad de mejorar el rendimiento de las máquinas industriales. Se llegó así a la formulación de los principios de la termodinámica que establecen la conservación de la energía y su progresivo paso a formas cada vez menos utilizables para producir trabajo.

TRES MODOS DE PROPAGACIÓN

No obstante, estos estudios no se interesaban por los mecanismos de la propagación del calor; la física de aquel tiempo, además, no estaba lo bastante

La Tierra es irradiada por el calor del Sol, que se propaga por el espacio vacío a lo largo de 150 millones de kilómetros.



A la izquierda, el calor del metal fundido se difunde por radiación a través de los rayos infrarrojos, mientras que el aire que lo circunda se calienta por contacto con el cuerpo caliente, difundiéndose a su vez.

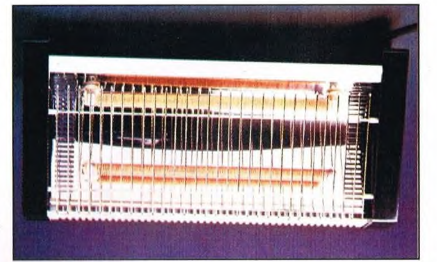
desarrollada como para comprender dos de los tres modos de que dispone el calor para transmitirse de un cuerpo más caliente a otro más frío, o, en general, para propagarse por el espacio. A primera vista parecería que hace falta un medio de propagación para lograr una transmisión a distancia: cuando dejamos inadvertidamente una cuchara encima de una sartén al fuego aprendemos a nuestras expensas que el calor se propaga a lo largo del mango de la cuchara. Partiendo de una temperatura baja, el cubierto se vuelve rápidamente caliente porque el calor fluye de la sartén a la cuchara. Basta pensar que a nadie se le ocurriría tocar con las manos desnudas un objeto colocado encima del fuego a menos que tenga un mango aislante.

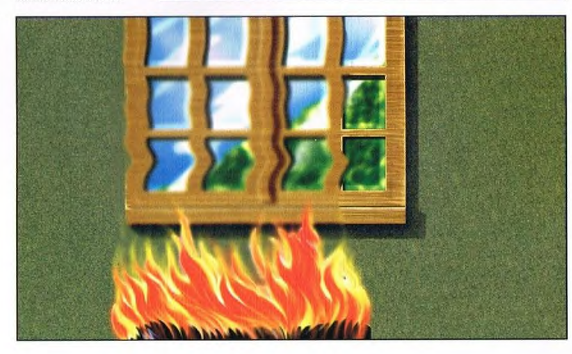
LA CONDUCCIÓN TÉRMICA: AISLANTES Y CONDUCTORES

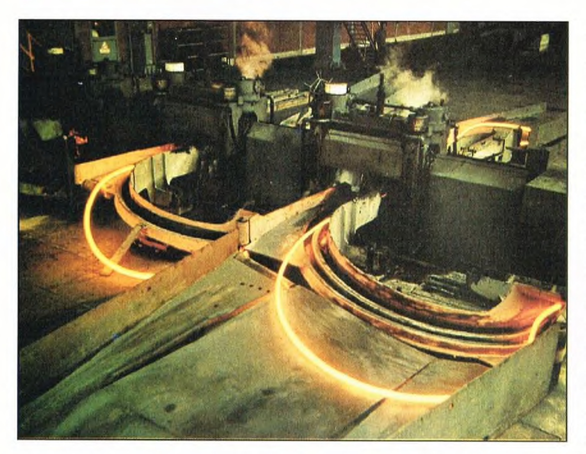
Este fenómeno nos dice que existen cuerpos que propagan el calor mejor que otros. Por tanto, podemos dividir los materiales en dos grandes categorías: los buenos y los malos conductores de calor. La diferencia macroscópica entre estas dos clases es evidente, pero resulta más difícil comprender qué los distingue a nivel microscópico. Supongamos que descendemos hasta los constituyentes fundamentales de la materia: los átomos y las moléculas. Sabemos que éstos están compuestos por partículas muy pequeñas y ligeras, los electrones, que poseen una carga negativa; estas partículas se mueven alrededor de otras más pesadas, los protones, cargados positivamente, y los neutrones, que como su nombre indica son neutros. El comportamiento de los electrones no es el mismo en todos los materiales. Existen sustancias en las cuales los electrones están fuertemente unidos a los protones y neutrones que forman los núcleos atómicos alrededor de los cuales se mueven. Esto significa que un electrón nunca se aleja demasiado del núcleo al que está ligado (o de los núcleos, si forma parte de una molécula). En otros casos, los electrones se comportan de un modo diferente, ya que son libres de pasar por las proximidades de todos los núcleos que constituyen el objeto de examen. En este segundo caso, los electrones se llaman electrones de conducción. Naturalmente, también en presencia de electrones de conducción hay otros electrones, llamados electrones ligados, que siempre permanecen cerca del núcleo. ¿Por qué son tan importantes los electrones de conducción? Supongamos que calentamos un cuerpo; sabemos que el calor es una forma de energía, lo que significa que estamos suministrando energía al cuerpo. Esta energía se incorpora al movimiento de las partículas que constituyen el objeto que estamos calentando, un movimiento microscópico y por lo tanto caótico. Naturalmente, las primeras que absorben la energía son las partículas más ligeras, los electrones, que a su vez pueden transferir parte de su energía cinética (energía de movimiento) a los núcleos a través de choques. Pero si los electrones no son libres de desplazarse a lo largo del

A la derecha, el fenómeno de la convección se puede percibir observando una hoguera. La imagen situada detrás de la pira aparece distorsionada por la columna de aire caliente que sube.

Las estufas eléctricas producen calor a través de resistencias. Éstas calientan el aire circundante, que se difunde por el ambiente, calentándolo por convección. Parte del calor se difunde también por radiación a través de una superficie especular situada detrás de la resistencia, que refleja su imagen.







Arriba, el calor situado en el extremo de una barra de metal se propaga al resto del cuerpo por medio del fenómeno de la conducción.

cuerpo calentado, la energía queda confinada a la zona donde se ha suministrado y el calor no puede propagarse: esto es lo que sucede en los cuerpos aislantes. Los cuerpos aislantes, por tanto, son aquellos donde no existen electrones de conducción. En un conductor, en cambio, todo átomo tiene uno o más electrones en condiciones de moverse libremente a lo largo de todo el cuerpo. En tal caso, los electrones no ligados pueden transportar su energía cinética lejos de la fuente de calor y éste se puede propagar.

Abajo, los cuerpos se dividen en buenos y malos conductores de calor; el mango de una marmita está formado por estos últimos para permitir agarrarlos con la mano; en cambio, el fondo, que debe calentar los alimentos, es un buen conductor.



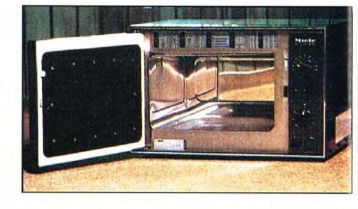
LA CONVECCIÓN

Hay otro modo de propagar calor a través de un medio material, que también es objeto de experiencia casi cotidiana: la convección. Pensemos en lo que sucede en invierno: la temperatura se reduce y para combatir los rigores de la estación fría se encienden las calefacciones. En general, éstas funcionan con agua: una caldera calienta gran cantidad de agua que es bombeada a las casas a través de tuberías. El agua es un pésimo conductor del calor, por lo que no podemos invocar el mecanismo de la conducción, que sólo funciona de un modo óptimo para los metales, los cuales tienen muchos electrones de conducción: en las moléculas de agua los electrones están firmemente ligados a los átomos de hidrógeno y oxígeno que las componen. Pese a esta desventaja, los sistemas de calefacción funcionan. ¿Pero en base a qué principio? Evidentemente es el agua misma la que transporta materialmente el calor que posee. Hay, pues, un transporte material de la energía térmica de un cuerpo y el correspondiente fenómeno toma el nombre de convección. También en este caso hay numerosas aplicaciones observables en la naturaleza. Pensemos, por ejemplo, en las corrientes marinas, en las cuales auténticos ríos de agua caliente se mueven por mares y océanos. La más famosa es la Corriente del Golfo, que parte de los cálidos mares tropicales para llegar hasta las costas británicas, mitigando su clima, que de lo contrario sería mucho más severo. También podemos pensar en los vientos, por ejemplo en el cálido siroco, que cuando sopla produce jornadas calurosas, incluso cuando la temperatura es relativamente baja. A escala reducida, se pueden observar fenómenos de transporte del calor por convección en una columna de aire caliente que asciende por encima de un fuego o de una superficie incandescente, o en el agua caliente que sube por una olla puesta al fuego. Hay convección cuando un objeto caliente se mueve de un lugar a otro.

A la derecha, en un horno de microondas no se produce transferencia de calor por métodos convencionales: los alimentos son calentados uniformemente por medio de ondas electromagnéticas.

LA RADIACIÓN: UNA PROPAGACIÓN SIN MATERIA

Queda un fenómeno que no puede explicarse por una propagación debida a un medio material. Si estamos tomando el sol un día de buen tiempo, percibiremos el calor que irradia nuestra estrella y que llega hasta nosotros. Naturalmente a la sensación de tibieza contribuye el aire caliente que nos rodea y que transmite a nuestra piel parte del calor que nos llega. Pero esta explicación no puede bastar, porque es difícil, en tal caso, comprender cómo el paso de una nube por delante del Sol hace que el calor que sentimos se reduzca de un modo tan brusco. Si el calor nos llegara sólo a través del aire, el paso de la nube no debería alterar la temperatura; es difícil creer que las nubes arrastren consigo una columna más fría de aire de varios kilómetros de altura. Pero hay otra dificultad: admitamos que el calor que nos llega en un día soleado procede íntegramente del aire que nos rodea. ¿Qué ha calentado el aire? La Tierra está muy lejos del Sol, unos 150 millones de km, y entre la Tierra y el Sol hay un vacío muy pronunciado. Por tanto, si el calor se propagara sólo a través



Las corrientes marinas transfieren por convección el calor, que en la zona ecuatorial afluye en mayor cantidad a causa de una mayor irradiación solar.

de los cuerpos materiales, sería imposible que el Sol calentara nuestro planeta. En realidad, de la superficie caliente del Sol parten radiaciones electromagnéticas que se propagan sin necesidad de soporte material. Sobre la Tierra incide continuamente un flujo de fotones solares con características diversas. Nuestros ojos logran percibir parte de estos fotones, los que corresponden a la longitud de onda de la luz visible; sin embargo, se trata de una mínima parte de la radiación electromagnética que procede del Sol. Se emiten también gran cantidad de radioondas, rayos infrarrojos, rayos ultravioletas, rayos X y rayos gamma. Estos últimos tres tipos de radiaciones son detenidos por la alta atmósfera terrestre y sólo una mínima parte de los rayos ultravioletas consigue alcanzar la superficie de nuestro planeta. Al contrario, las ondas de radio y los rayos infrarrojos consiguen penetrar más fácilmente en la atmósfera y también pueden detectarse en el suelo. En particular, la radiación infrarroja es la que sentimos en nuestra piel cuando nos exponemos a los rayos del Sol y experimentamos una sensación de calor. Un simple experimento nos demuestra que el calor puede propagarse en línea recta, como la luz, y es desviado por lentes y bloqueado por obstáculos opacos, como hemos visto. Con una lente de aumento podemos quemar un pedazo de papel concentrando sobre él la luz procedente del Sol. Esto sucede no porque la luz lleve el calor del Sol sino porque, además de luz, llegan hasta nosotros rayos infrarrojos emitidos por la superficie caliente de nuestra estrella. Al focalizar la luz focalizamos también los rayos infrarrojos, y éstos calientan el papel hasta provocar su combustión. Por tanto, el calor se propaga de tres maneras diferentes: transportado por los electrones de conducción de ciertas sustancias, llevado por una corriente de materia más caliente que la circundante, o a través de las ondas electromagnéticas, capaces de viajar por el espacio vacío.

EXPERIMENTO

LA PROPAGACIÓN DEL CALOR

En casa, podemos realizar fácilmente experimentos sobre la propagación del calor. Naturalmente hay que ir con gran cuidado de no quemarse. Para demostrar la conducción del calor, podemos realizar un experimento seguro con una taza que contenga agua caliente y sumergiendo en ella un tenedor o una cuchara fría, mejor si son de plata, dado que este metal es un excelente conductor de calor. Al poco tiempo, sentiremos que el cubierto se calienta, lo que demuestra el paso del calor de la parte en contacto con el agua a la que ha permanecido fuera. Podemos constatar fácilmente la convección poniendo la mano encima del hornillo encendido (a una distancia prudente del fuego): sentiremos la columna de aire caliente que asciende desde el fuego calentando la parte de nuestra mano en dirección a él. La propagación por radiación se detecta fácilmente exponiendo un termómetro a los rayos solares: la columna de mercurio, al subir poco a poco, revelará la exposición a los rayos infrarrojos del Sol, que llevan el calor hasta nosotros.



RAYOS SOLARES EN LUGAR DE VIENTO

Velas solares grandes como campos de fútbol podrían ser llevadas alrededor de la Tierra por cohetes normales y empujadas hacia el interior del sistema solar por la única fuerza de la radiación solar.



Es realmente posible viajar por el sistema solar dejándose llevar por el viento, como sucede en la Tierra con los barcos en el mar? La respuesta es indudablemente afirmativa.

Pero es necesario dejar clara una cosa: el viento solar, que es un flujo de protones y electrones de alta velocidad emitidos por el Sol, juega en realidad un papel mínimo. Su empuje es entre 1.000 y 10.000 veces menor que el debido a la luz. Por tanto, es la luz del Sol la que sopla sobre las velas espaciales, aunque de forma bastante débil si la comparamos con el viento terrestre.

EL MECANISMO

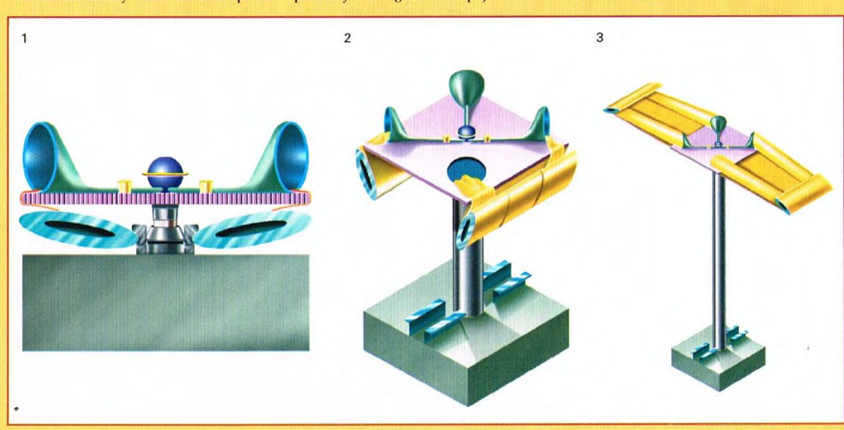
Partamos del principio de equivalencia entre la masa y la energía, expresado por la conocida fórmula $E = mc^2$, donde c es la velocidad de la luz y m la masa. Dado que la luz (como en general todas las radiaciones electromagnéticas) transporta una energía igual al producto de la constante de Planck por su frecuencia, podemos considerarla formada por unos corpúsculos (los fotones) carentes de masa pero dotados de energía y moviéndose a la velocidad de la luz (igual a unos 300.000 km/s).

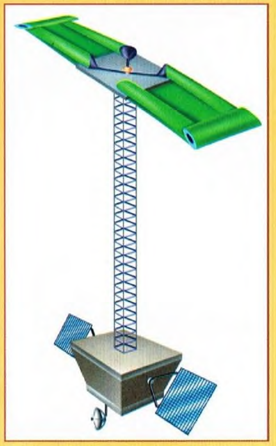
Cuando los fotones golpean la superficie de la vela entra en juego un principio físico denominado conservación de la cantidad de movimiento, según el cual el producto de la masa por la velocidad del sistema formado por los dos cuerpos permanece constante antes y después del choque. Dicho de un modo más sencillo, este principio dice que si la vela es iluminada por la luz solar como si fuese bombardeada por infinidad de fotones, éstos, al golpear la superficie, son desviados (reflejados o absorbidos), con lo que generan una presión y dan origen a un empuje.

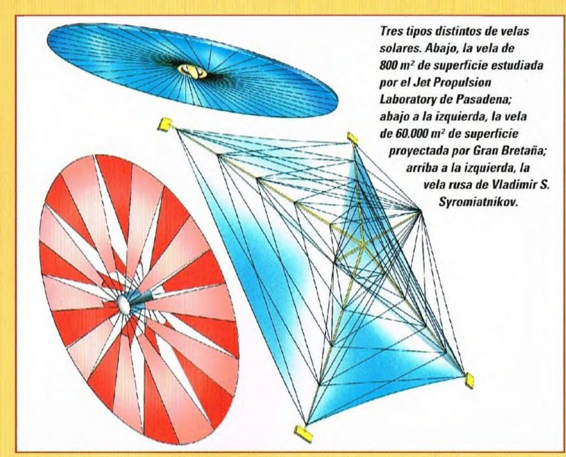
La intensidad y la orientación de este empuje dependen del inverso del cuadrado de la distancia Sol-vela. Al aumentar la distancia al Sol, en efecto, la fuerza, a igualdad de superficie de la vela, disminuye cuadráticamente porque los fotones emitidos radialmente por el Sol se van dispersando. La intensidad y la orientación dependen también de la superficie de la vela, del ángulo de incidencia radiación-vela y de las características de reflexión-absorción de la vela; si la vela es perfectamente reflectora, la fuerza es el doble que en el caso de una superficie perfectamente absorbente.

Para hacerse una idea de lo exiguo de las fuerzas en juego, piénsese que a 150 millones de km del Sol, que es la

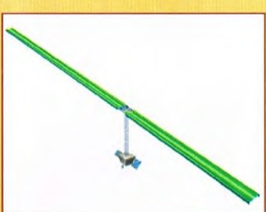
Abajo, en el dibujo se muestra el módulo puesto en órbita, en el cual la vela está plegada, en tres momentos distintos.







Tres tipos distintos de velas solares. Abajo, la vela de 800 m² de superficie estudiada por el Jet Propulsion Laboratory de Pasadena; abajo a la izquierda, la vela de 60.000 m² de superficie proyectada por Gran Bretaña; arriba a la izquierda, la vela rusa de Vladimir S. Syromiatnikov.



Arriba a la izquierda, al lado y abajo a la izquierda, los tres dibujos ilustran las tres fases de apertura de la vela solar proyectada por Alenia Spazio para una regata cósmica hacia Marte. El proyecto, que debía haber partido en 1992, nunca se llevó a la práctica.

distancia de la Tierra al Sol, la fuerza ejercida por la presión de la luz incidente perpendicularmente a una vela perfectamente reflectora de 10.000 m² (una hectárea, igual al área de un cuadrado de 100 m de lado) es de unos 0,09 newton (de unos 9 g en la Tierra). La pregunta que inmediatamente viene a la mente es entonces la siguiente: con una fuerza tan pequeña, ¿cómo llegar, por ejemplo, a Marte? ¿Y cómo es posible hacerlo en un tiempo relativamente breve?

La respuesta es muy simple. En el espacio, como es sabido, no hay rozamientos, por lo que una pequeña fuerza aceleradora basta para obtener continuos incrementos de velocidad (la cual llegará a ser bastante elevada). Además, la nave no parte del reposo en su hipotético viaje a Marte, pues en el momento de su lanzamiento se mueve alrededor del Sol con la misma velocidad que la Tierra (30 kilómetros por segundo, igual a 108.000 kilómetros por hora).

UN POCO DE HISTORIA

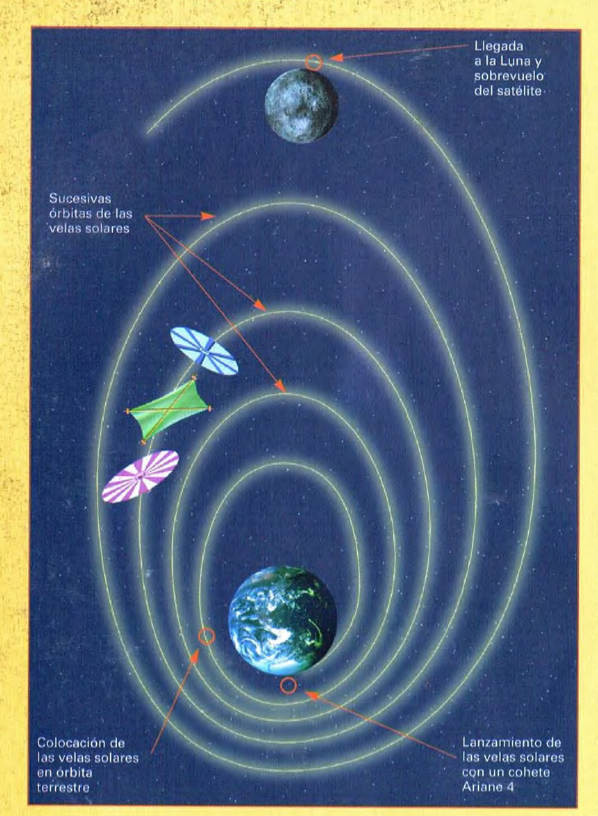
En 1921, Konstantin Eduardovich Tsiolkovski, el gran científico soviético, realizó un primer estudio sobre las velas solares para viajar por el sistema solar. Tsiolkovski se inspiró en ideas surgidas a fines del siglo XIX en la literatura de ciencia ficción de aquella época.

Los conceptos básicos, aunque muy simples, se encuentran en las *Aventuras extraordinarias de un científico ruso*, de Henri de Graffigny, pero sobre todo en la historia *Sobre las ondas etéreas* de B. Krasnogorski, el cual describe detalladamente el empuje que una vela puede sufrir por parte de la radiación solar.

Es obvio que todo aquello debía encontrar unas bases científicas. Estas bases las suministró Lebedev, quien en 1897 demostró la existencia de la presión ejercida por la radiación solar.

Tsiolkovski comprendió que aquellas ideas tenían gran importancia y las sometió a un primer análisis en el libro publicado en 1921 bajo el título *El hombre en el espacio cósmico* y en algunos otros trabajos que no publicó.

Pero si Tsiolkovski no pasó de la valoración de la posibilidad de usar el viento solar como medio de transporte interplanetario, otro soviético, el científico Friedrich Arturovich Tsander, desarrolló el primer proyecto de un vehículo espacial propulsado por la presión solar. «Para viajar por el espacio interplanetario –escribió Tsander en 1924 – estoy trabajando en la idea de volar por medio de grandes espejos constituidos por hojas muy delgadas, pero capaces de garantizar resultados favorables.» En este escrito, Tsander explicó con detalle cómo la radiación solar podía empujar dichos espejos y llegó incluso



Así fue concebida la carrera de la Tierra a la Luna con las velas solares. Un Ariane 4 habría llevado simultáneamente tres velas a una órbita terrestre. Una vez desplegadas, éstas habrían empezado a describir órbitas cada vez mayores alrededor de la Tierra hasta llegar a la Luna. La vencedora hubiera sido la que primero fotografiara el lado oculto de nuestro satélite.

a proponer la construcción de una estación espacial cuyas características trazó.

Pero en aquel período era todavía difícil explicar cómo un cohete podía viajar por el espacio. Imagínese pues si unas ideas tan avanzadas podían interesar en los ambientes científicos.

Por ello, las velas solares permanecieron como simples apuntes de hombres imaginativos que como máximo lograron inspirar a algún autor de ciencia ficción. Hubo que esperar a 1951, cuando el ingeniero estadounidense Carl Willey publicó su *Clipper Ship of Space*, un artículo para la revista *Astounding Science Fiction* que firmó con seudónimo para no caer en el ridículo ante sus colegas.

Sólo siete años después pudo leerse el primer estudio técnico en una revista profesional; era de Richard Garwin, en aquel entonces asesor del Departamento de Defensa estadounidense.

En el mismo período, Ted Cotter, del Los Angeles Scientific Laboratory, realizó un trabajo teórico que analizaba los aspectos técnicos de una misión a base de velas solares.

En aquel momento, las iniciativas para profundizar en el tema proliferaron.

La NASA, apenas constituida (en 1948), bajó a la palestra organizando los primeros encuentros a nivel práctico sobre la construcción de velas solares. Fruto de estos encuentros y de estas investigaciones entre 1965 y 1967 fue el «heliogiro», una vela solar formada no de una sola pieza sino de varias superficies dipuestas como las hélices de un helicóptero.

LOS ÚLTIMOS EXPERIMENTOS

En 1973, se instalaron en la sonda Mariner 10 unas superficies capaces de realizar un control parcial de la posición por medio de la presión de la radiación solar. Todo ello propició muy pronto un proyecto que el Jet Propulsion Laboratory de la NASA propuso en 1977, relativo al lanzamiento de una vela hacia el cometa Halley.

Entre 1977 y 1978 se constituyó un grupo que trabajó en el llamado Halley Comet Rendez-Vous Solar Sail Program, dirigido por Louis Friedman. Este grupo construyó una vela solar en colaboración con algunas industrias y con otros dos centros de la NASA. Por desgracia, esta última no consideró el proyecto lo bastante seguro como para prepararlo para el año 1981, año en el que se debía lanzar el cohete con la vela a bordo, por lo que el proyecto fue suspendido.

Para paliar esta desilusión nació la World Space Foundation, que a fines de los años setenta construyó la primera vela solar con una hoja de mylar aluminizado.

Los proyectos faraónicos no tardaron en llegar. Robert Forward, investigador de Hughes en Malibú (California), tuvo la idea de construir un potente láser de microondas para colocarlo en órbita terrestre y empujar una vela, llamada Sterwisp, hasta la estrella más cercana, *Proxima Centauri*, a la cual habría podido llegar en 21 años.

A comienzos de los años noventa se vivió un nuevo auge de los estudios sobre velas solares. Además de la World Space Foundation, nacieron la Union pour la Promotion de la Propulsion Photonique en Francia, la Solar Sail Union en Japón y un organismo análogo en Gran Bretaña.

Con ocasión del quinto centenario del descubrimiento de América por Cristóbal Colón, se promovió una auténtica competición con velas solares, la Space Sail Cup; vencería quien antes hubiera llegado a la Luna, pero algunas velas hubieran podido proseguir hasta Marte.

Desgraciadamente, tampoco este proyecto se llevó a la práctica.



EN EL PRÓXIMO NÚMERO

EL SISTEMA SOLAR

SCHIAPARELLI Y LOS MARCIANOS

ESTRELLAS Y GALAXIAS

ESTRELLAS DE NEUTRONES Y PÚLSARES

GUÍA DE LAS CONSTELACIONES

EL COCHERO

LA EXPLORACIÓN DEL ESPACIO

LOS VIKING, EN BUSCA DE LA VIDA

EL USO DEL ESPACIO

ERS 1 Y ERS 2

EL UNIVERSO

ENCICLOPEDIA DE LA ASTRONOMÍA Y EL ESPACIO

29



PLANETA DeAGOSTINI



COMPOSICIÓN DE LA OBRA

Volumen 1	Fascículos 1	al	16
Volumen 2	Fascículos 17	al	32
Volumen 3	Fascículos 33	al	48
Volumen 4	Fascículos 49	al	64
Volumen 5	Fascículos 65	al	80

VENTA EN QUIOSCOS

Pida a su proveedor habitual que le reserve un ejemplar de EL UNIVERSO. Adquiriéndolo todas las semanas en el mismo punto de venta facilitará la distribución y obtendrá un mejor servicio.
Las tapas correspondientes a cada volumen se ponen a la venta con el fascículo que cierra el tomo. Con dicho fascículo se entregan las portadillas correspondientes.

Presidente: José Manuel Lara
Director General: Carlos Fernández
Director Editorial: Virgilio Ortega
Director General de Producción: Félix García
Coordinador General: Carles Dorico

© Editorial Planeta Argentina S.A.I.C.
Av. Independencia, 1668 - Capital Federal
Servicio de atención al cliente: Tel. (01) 482 - 0655 y 482 - 0657
Distribuye: Capital: Huesca-Sanabria,
Baigorri, 103, Capital Federal,
Interior: D.G.P., Alvarado, 2118, Capital Federal

© Editorial Planeta Mexicana, S.A. de C.V.
Av. Insurgentes Sur # 1162 - México D.F.
Servicio de atención al cliente: Tel. 575 13 48

© Editorial Planeta Colombiana, S.A.
Carrera, 68, n.º 25-55 - Santa Fé de Bogotá, D.C.
Servicio de atención al cliente: Tel. 9800 - 15315

© Editorial Planeta Chilena, S.A.I.C.
Olivares, 1229 - Santiago de Chile

ISBN Obra completa (con vídeo): 84-395-4148-1
Obra completa (sin vídeo): 84-395-4138-4
Fascículos (con vídeo): 84-395-4149-X
Fascículos (sin vídeo): 84-395-4139-2
Depósito legal: B-47.097-1997

Impresión: Cayfosa, Santa Perpètua de Mogoda, Barcelona
Impreso en España - Printed in Spain - Mayo 1998

Los editores se reservan el derecho de modificar el precio de venta de los componentes de la colección en el transcurso de la misma, si las circunstancias así lo exigieran.
Los editores garantizan la publicación de todos los fascículos que componen esta obra.

Fotografías: Lee Gibbons: cubierta, 116-117, 116ab., 117ar.; ESA/SPL: 107c.der.; E.T. Archive: 106ar.; Galaxy Picture Library: 101, 104, tercera de cubiertas; IGDA: 107ar.der.; Science Photo Library/Julian Baum: 106-107; Dr. Jeremy Burgess: 103 der.; Range: 111; Hugh Rowland: 110; Spectrum: 110, 111; US Naval Observatory: 112ar.izq.; Bristock-IFA: 114-115; BNSC/ESA: 118ab.; ESA: 118-119, 119ab., 120c.; Tony Stone Picture Library: 120ab.
Dibujos: Robin Carter/WLAA: 104-105, 117ab.; David A. Hardy: 102-103; Hugh Rowland: 105, 106ab., 120; Katz: 108-109; Sandra Russell/Black Hat: 112ar.; Julian Baum: 113; Farroxs: 116ar.; Robin Bottel: 115ab.; Spectrum Picture Library: 114ab.

SCHIAPARELLI Y LOS MARCIANOS

Hacia finales del siglo pasado, Marte, el planeta rojo que debe su nombre al dios de la guerra, fue el protagonista de una controversia muy particular.



A pesar de sus dimensiones más bien reducidas –hecho que se confirma desde la distancia que lo separa de la Tierra–, en las últimas décadas del siglo pasado, Marte fue el centro de un apasionado debate científico internacional. En aquella época se escribieron miles de artículos sobre el planeta rojo y los telescopios de todo el mundo apuntaron hacia él.

El interés por Marte creció cuando se observaron en él dos fenómenos astronómicos que se combinaron en las oposiciones de 1877, 1892 y 1909.

Por una parte, cada 780 días, Marte se encuentra muy próximo a la Tierra. Por otra, cada 15 años, coincidiendo con una oposición, el planeta está a menos de 56 millones de km de nosotros gracias a la acusada excentricidad de su órbita.

No faltaron los resultados científicos, fruto de todas estas observaciones: en Washington, el observatorio naval Asaph Hall descubrió dos pequeñas lunas que orbitaban en torno a Marte. El observatorio

En la imagen a toda página, fotografía de Marte tomada desde la sonda Viking 2. En la superficie se aprecian rocas y arena rojiza (por la presencia de óxido de hierro).

PERSONAJES

GIOVANNI SCHIAPARELLI



1835 - 1910

Nacido en 1835, después de obtener el título de ingeniero civil en la Universidad de Turín, Schiaparelli estudió astronomía en Berlín con J.F. Encke y en el observatorio de Pulkovo con F.W. Struve. En 1860 empezó a trabajar en el observatorio de Brera, del que fue nombrado director en 1862. A pesar de la modesta instrumentación que disponía, consiguió una sólida fama por sus trabajos sobre meteoritos y cometas –que le proporcionaron una medalla de oro de la Royal Astronomical Society–, antes incluso de su descubrimiento de los canales de Marte. Su fama era tal que, a su muerte, fue recordado en las necrologías como el más grande científico italiano y como uno de los astrónomos más importantes de su tiempo. La consideración que le dispensaron hasta sus detractores era debida, en parte, al modo cauto y prudente con que presentaba sus conclusiones.
También hizo estudios sobre los períodos rotacionales de Venus y Mercurio. Obtuvo unas medidas que gozaron de aceptación general y que sólo en nuestro siglo fueron rechazadas por erróneas.

de Brera, en Milán, anunció, a través de Giovanni Schiaparelli, el descubrimiento de un amplio sistema de canales en el planeta rojo.

EL PRIMER MAPA Y LOS CANALES

Con un telescopio refractor de 22 cm, Schiaparelli inició una serie de larguísimas observaciones del planeta Marte que se prolongaron a lo largo de 20 años y que empezaron con la oposición de 1877 (durante una oposición, Marte se encuentra en la parte opuesta de la Tierra respecto al Sol).

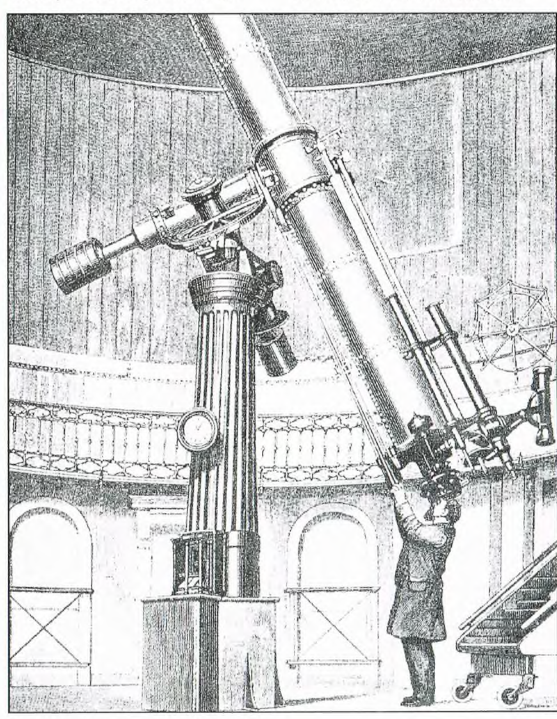
En una primera memoria presentada en 1878 a la Real Academia de los Linces, y que se abría con una nueva determinación del eje de rotación del planeta, Schiaparelli propuso su primer mapa de la superficie de Marte en el que empleó una nueva nomenclatura basada en la geografía antigua y la mitología. Esta nomenclatura provocó controversia, ya que, en aquellos años, la mayor parte de los astrónomos aplicaba un sistema que utilizaba los nombres de los principales observadores de Marte. El sistema, inventado por Proctor en 1867, había sido ampliado por Green y revisado por Flammarion, lo que redujo el número de nombres de astrónomos ingleses. El uso que hacía Schiaparelli de palabras como «mar» para designar zonas oscuras de color gris verdoso y «continente» para las de color rojizo no suscitó grandes interrogantes sobre su justificación efectiva, y el propio Schiaparelli escribió que estos nombres no eran más que un simple artificio para ayudar a la memoria y abreviar las descripciones, por lo cual no prejuzgaban la naturaleza real de estos accidentes.

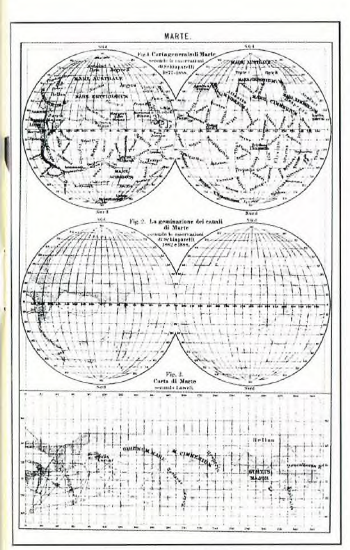
En su mapa, los mares no estaban separados entre sí, sino que aparecían unidos por finas líneas oscuras que Schiaparelli llamó canales, empleando una expresión introducida por el padre Angelo Secchi en una publicación de 1859.

SE ABRE UN DEBATE SOBRE LOS CANALES

A pesar de que Schiaparelli no se consideraba el descubridor de los canales, sino tan sólo de su extensión y complejidad,

Giovanni Schiaparelli en la cúpula de Brera durante una de sus observaciones de Marte.





Arriba, mapas de Marte elaborados según las observaciones de Schiaparelli (arriba y en el centro) y de Lowell (abajo).

después de estos resultados, su trabajo se hizo muy pronto famoso en toda Europa y también en América.

Uno de los elementos que contribuyeron a alimentar las polémicas que surgirían en las décadas siguientes fue la traducción del término «canali» por *canal* en inglés, que en esta lengua tiene el significado de estructura artificial, en vez de hacerlo por *channel* que, en cambio, designa una formación geográfica natural.

El francés Flammarion fue uno de los primeros que sostuvo y propagó los trabajos de Schiaparelli. Flammarion era un célebre y popular divulgador de astronomía que había abandonado el observatorio de París para dedicarse totalmente a la divulgación. Estaba convencido de la existencia de habitantes en otros planetas y confirmó la existencia de los canales que, según él, debían llevar agua de los casquetes polares a otras regiones. La traducción de sus libros a muchos idiomas, en los que apoyaba la idea del astrónomo de Brera, contribuyó a difundir la idea de que las estructuras marcianas eran de origen artificial.

El mundo científico acogió de forma muy diversa la hipótesis de los canales: en Francia y Bélgica las reacciones fueron positivas, pero en Inglaterra no fueron muy favorables. Esta diversidad dependía también del hecho de que, en 1877, Nathaniel Green, un artista que enseñaba pintura a la reina Victoria, había elaborado un mapa de Marte en el que no aparecía ningún canal.

GEMINACIÓN

Con la oposición de 1877-1880, el mundo científico inglés también empezó a inclinarse por la tesis del italiano, e incluso algunos astrónomos ingleses vieron canales que surcaban la superficie de Marte. El propio Schiaparelli hizo otras observaciones y publicó nuevos trabajos con sus correspondientes mapas y canales, a pesar de que en éstos, los bordes eran menos nítidos. Pero observó un nuevo fenómeno que denominó geminación: a derecha e izquierda de algunas líneas preexistentes, sin cambios en su curso ni en su dirección, se había producido otra línea igual y paralela a la primera.

También Flammarion publicó un trabajo similar en el que decía haber visto 60 canales y no menos de 20 geminaciones.

La noticia de este nuevo descubrimiento se difundió rápidamente, y fue entonces cuando un número significativo de astrónomos afirmó haber observado los canales. La primera *Historia popular de la astronomía del siglo XIX* decía que los canales de Marte eran ya un hecho verificado.

ALGUNAS TEORÍAS

Para la oposición de 1886, el observatorio de Brera había adquirido un refractor de 50 cm, pero tanto en ésta como en las siguientes oposiciones, algunos grandes observatorios, como el naval de Washington, comunicaron no haber observado canales en el planeta rojo. La controversia era particularmente viva en la British Astronomical Association, constituida en 1890 y que admitía también a mujeres. No sólo las observaciones, sino también las teorías que habían de explicarlas, atrajeron la atención internacional. Las más comunes sostenían que la presencia de agua en Marte era posible porque el planeta retenía el calor procedente del Sol, en parte debido a que la baja densidad de la atmósfera marciana no reflejaba la radiación incidente y, en parte, porque durante la noche se formaban nubes que retenían el calor acumulado durante el día.





A la izquierda, Percival Lowell; a la derecha, Eugene Michael Antoniadi, dos de los protagonistas del debate sobre los canales.

PERCIVAL LOWELL

En medio de esta confusa situación internacional, en la que muchos astrónomos sostenían ver canales mientras que otros empezaban a dudar de su existencia, entró en el debate Percival Lowell, un rico estadounidense, defensor convencido de la vida en Marte, que en su juventud había estudiado astronomía y que después de varios desplazamientos motivados por su trabajo (incluso había estado en el Sureste asiático),



Marte iluminado por el Sol, fotografiado por la sonda Viking 2.



Camille Flammarion (a la izquierda) y Percival Lowell (a la derecha) en el observatorio de Juvisy en 1908.

decidió fundar un observatorio en Flagstaff, Arizona, donde las condiciones de observación eran óptimas. En su libro titulado *Mars*, publicado en 1895, Lowell describía los resultados de las observaciones que había hecho el año anterior y que confirmaban los resultados de Schiaparelli. También sostenía haber observado 184 canales (contra los 79 del italiano). La explicación de Lowell era que, con la fusión alternada de los casquetes polares, el agua fluía hacia las zonas áridas ecuatoriales a lo largo de canales construidos expresamente, lo que, según él, quedaba confirmado por la vegetación que, decía, era reconocible en las manchas oscuras que bordeaban los canales.

La energía y el carisma indudable de Lowell contribuyeron a la difusión de la imagen de Marte como un mundo habitado por seres capaces de proyectar y realizar obras hidráulicas enormes. Junto a Flammarion en Francia, Lowell era en aquellos años el paladín enfervorizado de un universo en el que el hombre no era la única criatura inteligente.

Sin embargo, no todas las críticas fueron positivas. Campbell, en *Science*, acusó a Lowell de sensacionalismo, de ideas preconcebidas y de desacreditar el trabajo de los astrónomos.

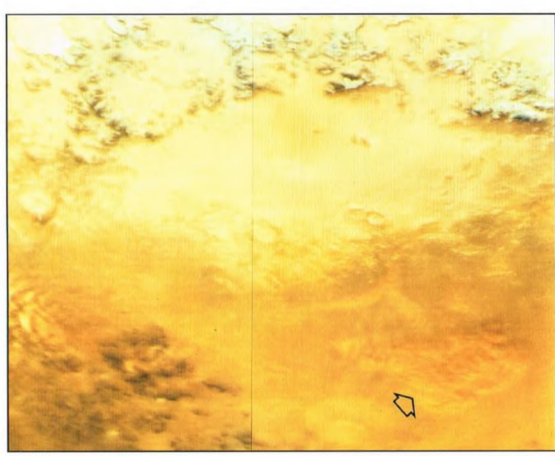
ENCUENTRO CON SCHIAPARELLI

Durante su viaje a Europa en 1895-1896, Lowell se encontró también con Schiaparelli, que discutió con él su último trabajo, un ensayo sobre la vida en Marte, en el cual se ponían de manifiesto las inclinaciones especulativas del astrónomo italiano. Esta tendencia de Schiaparelli se confirma también por la explicación que dio de las geminaciones: según su hipótesis, los desdoblamientos no eran más que diques o canales construidos por los ingenieros marcianos en dos niveles a lo largo de los declives de los valles de Marte.

LOS OPOSITORES

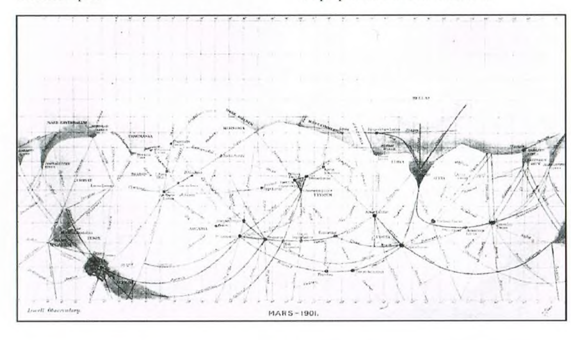
Si Schiaparelli, Flammarion y Lowell eran los exponentes de la teoría de los canales, a finales de siglo surgieron el francés Eugene Michael Antoniadi y el italiano Vicenzo Cerulli que se opusieron a esta hipótesis.

Antoniadi, que había trabajado con Flammarion en el observatorio de Juvisy, puso en duda la fiabilidad de las observaciones de los canales, sosteniendo que la duplicación era una ilusión óptica derivada de errores de enfoque del telescopio.



Arriba, detalle de la superficie de Marte con una tormenta de arena (indicada por la flecha). En el suelo del planeta no hay canales ni otras construcciones artificiales.

En cambio Cerulli, fundador del observatorio de Téramo, sostenía que los canales eran simples alineaciones de manchas y que cuando se construyeran instrumentos más potentes perderían su forma lineal. Según él, la observación errónea se debía a la tendencia del ojo a unir puntos separados, lo que les daba la apariencia de líneas. En espera de confirmar esta idea, centró sus observaciones en el canal Lethes, que consiguió resolver en «un sistema complejo e indescifrable de pequeñas manchas distintas».



A la derecha, mapa dibujado por Lowell en 1901 y publicado en los anuarios del Lowell Observatory.

Huygens (1659)

Herschel (1777)

Schroter (1798)

Beer y Madler (1830)

Dawes (1864)

Green (1877)

Schiaparelli (1884)

Lowell (1894)

UN ENCUENTRO DE ALTA TENSIÓN

El 30 de marzo de 1910 se produjo una situación de alta tensión cuando los miembros de la British Astronomical Association se encontraron ante Percival Lowell. Aunque recibió la invitación del presidente de la prestigiosa institución sólo dos horas antes, Lowell la aceptó inmediatamente y se presentó en la asociación de la que durante dos décadas había recibido las críticas principales a su teoría de los canales. Tal como informó el boletín de la institución, el discurso de Lowell demostró el carisma del astrónomo estadounidense a quien el presidente dio las gracias por haber ofrecido la media hora más fascinante que jamás habían vivido las convenciones de la asociación. El debate que siguió a la conferencia de Lowell estuvo más marcado por la cortesía que por el contenido.

Al lado, observaciones visuales de Marte desde Huygens a Lowell, a lo largo de los siglos.

Estas observaciones afectaron mucho a Schiaparelli –que consideraba a Cerulli como un sucesor muy prometedor– y le indujeron a hacer una crítica muy severa del libro que su alumno había escrito en 1899.

UNA REVANCHA MOMENTÁNEA

En 1905, Lowell proclamó que, con un colaborador suyo, había conseguido fotografiar canales de Marte. La noticia dio la vuelta al mundo y Schiaparelli le escribió que «nunca lo hubiera creído posible», mientras algunos predecían que la teoría de las ilusiones ópticas quedaría relegada a la oscuridad de la historia.

El éxito duró poco, ya que, cuando los expertos examinaron los negativos, no vieron los canales, sino solamente unas señales confusas de figuras diferentes en las fotografías de la misma región.

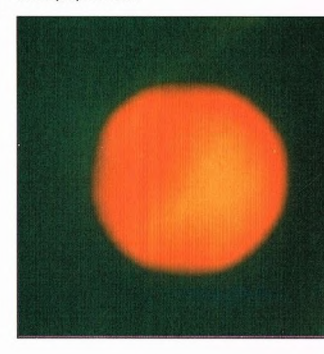
La gran oposición de 1909 estuvo acompañada de una cantidad enorme de publicaciones, muchas de las cuales informaron de la descomposición de los canales en pequeños detalles separados. Una aportación fundamental llegó del observatorio de Monte Wilson, donde Hale había observado detalles intrincados, pero ningún rastro de canales.

CONCLUYE LA DIATRIBA

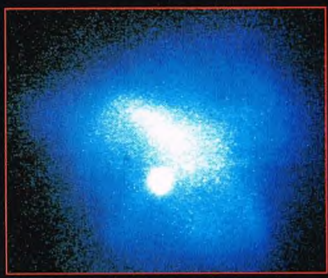
Hacia 1912, casi toda la comunidad científica estaba de acuerdo en considerar que los canales no eran más que estructuras complejas que, en el telescopio, podían resolverse en manchas. Algunos observadores ya lo habían conseguido y, con ello, se ponía fin a una de las diatribas astronómicas más importantes de las últimas décadas del siglo pasado.

En una carta de 1907 a Cerulli, Schiaparelli aceptó las ideas de su discípulo y, muy probablemente, si Lowell hubiese sabido el cambio de opinión del italiano, la estima y la consideración en que tenía a su «querido maestro de Marte», como solía llamarle, le hubieran hecho renunciar a las últimas observaciones.

Así se ve Marte desde la Tierra con un telescopio profesional.



ESTRELLAS DE NEUTRONES Y PÚLSARES



Uno de los púlsares más famosos es el del Cangrejo (PSR 0531+21), que toma el nombre de su posición dentro de la nebulosa del Cangrejo, remanente de supernova que se formó en 1054 d.C. por la explosión de supernova de la estrella progenitora del propio púlsar. El púlsar del Cangrejo es observable también en la región visible del espectro electromagnético, donde aparece como una estrella de magnitud aparente 16,7.

Los púlsares son algunos de los objetos más interesantes de la ciencia moderna. La fascinación que ejercen sólo es comparable a la de los casi legendarios agujeros negros. Descubiertos inicialmente como misteriosas fuentes de impulsos radio, los púlsares son ahora algunos de los cuerpos celestes con los que más se han familiarizado los astrónomos.

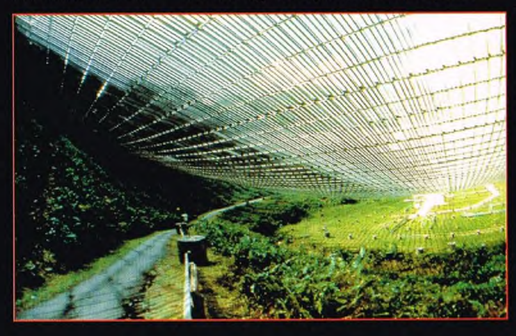
El nombre de púlsar corresponde al acrónimo de las palabras inglesas *pulsating star*, es decir, estrella pulsante. En efecto, la característica principal que distingue estos objetos es que no emiten radiación electromagnética de manera continua, sino en forma de pulsos radio regulares, exactamente igual que una lámpara intermitente. Además, estos pulsos son muy rápidos. Según los púlsares, la duración de cada uno de ellos (período) puede ir desde algunos milisegundos hasta un máximo de algunas decenas o centenares de segundos. A pesar de que la forma de un pulso, lo mismo que su período, varía de un púlsar a otro, en todos ellos se mantiene razonablemente constante. De igual manera, el período de pulsación de un púlsar sufre variaciones apreciables sólo a lo largo de tiempos muy dilatados.

LOS PÚLSARES COMO RELOJES

Debido a la regularidad de su período de pulsación, los púlsares pueden considerarse verdaderos relojes cósmicos. En efecto, como es sabido, cada sistema de medida del tiempo, desde el más sencillo hasta el más complejo, se basa en la repetición de un fenómeno periódico. Por ejemplo, el período de rotación terrestre define la duración del día solar, mientras que el movimiento de la Tierra alrededor del Sol determina la duración del año solar. Naturalmente, para que las medidas del tiempo sean coherentes, el período del fenómeno sobre el que se basa la medida debe ser lo más constante posible. Esto es lo que ocurre en los púlsares: aunque su período de pulsación disminuye con el tiempo, lo hacen a un ritmo muy bajo, típicamente del orden de 10^{-14} s/s. Es decir, el período de pulsación cambia únicamente un segundo cada 10^{14} segundos. Un tiempo, por tanto, que corresponde a ¡unos 3 millones de años! Esto hace que, en cuanto a precisión, los púlsares estén en condiciones de competir con los mejores relojes atómicos.

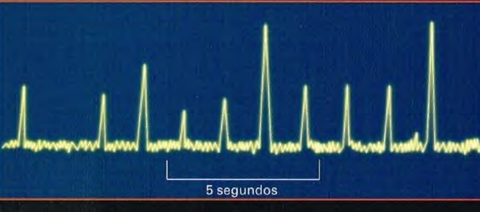
EL DESCUBRIMIENTO DE LOS PÚLSARES

La historia del descubrimiento de los púlsares es bastante curiosa y merece contarse con detalle, porque es una clara demostración de cómo, incluso en el mundo de la investigación científica, la casualidad puede tener un papel determinante. El primer púlsar, el PSR 1919+21, fue descubierto en 1967 por Jocelyn Bell y Anthony Hewish, del Instituto de Radioastronomía de la Universidad de Cambridge. Por aquel entonces, Jocelyn Bell

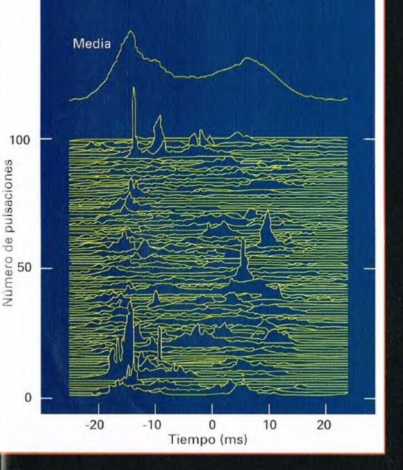


Para poder observar los púlsares es indispensable emplear instrumentos especiales, capaces de detectar las ondas de radio. Estos instrumentos son los radiotelescopios. Uno de los mayores del mundo se ha construido en Arecibo (Puerto Rico). Tiene la forma de un enorme paraboloide, montado dentro de una vasta concavidad natural.

era una joven recién licenciada en física por la Universidad de Cambridge que estaba haciendo algunas investigaciones de radioastronomía para su tesis doctoral. Para este trabajo, Jocelyn debía dedicar cierta cantidad de horas a recoger datos escrutando el cielo con un radiotelescopio, una de estas tareas de rutina a las que tantas veces se dedica algún joven licenciado con su mejor voluntad. Durante una de estas observaciones, sin embargo, Jocelyn hizo un descubrimiento absolutamente inesperado: detectó una señal radio de intensidad moderada procedente de una región concreta del firmamento próxima al plano de nuestra Galaxia. Lo curioso era que la señal detectada era intermitente, es decir, desaparecía y aparecía a intervalos de tiempo regulares, con una duración de algo más de un segundo (exactamente, 1,377 s). En este punto, la leyenda cuenta que Jocelyn corrió con gran agitación a explicar el descubrimiento a su profesor, el cual no le concedió mayor importancia y atribuyó el fenómeno a alguna interferencia con señales radio terrestres. Sin embargo, la señal detectada continuaba produciéndose independientemente de las actividades radio terrestres, signo evidente de que debía tener un origen extraterrestre y proceder de alguna fuente no identificada. Naturalmente, apenas se publicó el descubrimiento, miembros y no miembros de la comunidad científica, empezaron a fabular en torno a posibles señales radio de origen artificial, emitidas por alguna fantasmagórica civilización extraterrestre. Por otra parte, eran tiempos en los que los avistamientos de objetos volantes no identificados, los famosos OVNI, se producían cada vez con más frecuencia y el debate científico sobre la existencia de civilizaciones extraterrestres estaba más vivo que nunca. Por fortuna, la ciencia ha seguido caminos menos fantasiosos y, como veremos más adelante, pudo aclararse la naturaleza de los púlsares. Entretanto, el descubrimiento de los púlsares dio a Jocelyn Bell el doctorado en investigación y un lugar en la historia de la astronomía, lo mismo que a su profesor, Anthony Hewish, que obtuvo además el premio Nobel de física.



Como en el caso de las estrellas variables, la emisión periódica de un púlsar se visualiza construyendo su curva de luz gracias a la cual es posible determinar también las características del impulso. En muchos casos, la curva de luz de un púlsar se caracteriza por la presencia de un pico muy agudo, mientras que en las otras zonas el diagrama aparece prácticamente plano. El pico en la curva de luz corresponde, naturalmente, al impulso observado, mientras que las regiones planas indican la ausencia de señal por parte del púlsar.



A la izquierda, el gráfico muestra la marcha de 100 pulsaciones sucesivas del púlsar PSR 1133+16. La línea de arriba indica la media de las observaciones. Estas medidas se obtienen con los radiotelescopios, indispensables para captar los débiles impulsos radio procedentes del púlsar.

LA NATURALEZA DE LOS PÚLSARES

Después del descubrimiento del púlsar PSR 1919+21, siguieron muchos otros, y los astrónomos se convencieron de que debía tratarse de un tipo de fuentes celestes bastante común. Obviamente, los cuerpos celestes más corrientes de todo el universo son las estrellas y, por tanto, se pensó que los púlsares eran cuerpos de tipo estelar. De acuerdo con esta idea, una de las posibles interpretaciones era que las pulsaciones observadas podían explicarse suponiendo que, de algún modo, dependían de contracciones y expansiones radiales de la estrella. Sin embargo, tales oscilaciones producirían rápidamente condiciones de inestabilidad en el interior de la estrella, lo que la condenaría a extinguirse en un tiempo corto. Evidentemente, esta explicación contradecía los datos de que se disponía, según los cuales, los púlsares presentan unas pulsaciones muy regulares durante largos intervalos de tiempo. La única explicación coherente que podía darse era que la pulsación se producía a consecuencia de la rotación rápida de una estrella alrededor de su eje. En este

Abajo, la astrónoma Jocelyn Bell, a quien se debe el descubrimiento de los púlsares.



caso, los períodos que se observaban en los púlsares permitían sacar conclusiones sobre la naturaleza misma de la estrella. Según las leyes de la física, para que un cuerpo en rotación sobre sí mismo sea dinámicamente estable, debe cumplir una condición de equilibrio entre la fuerza gravitatoria, que depende de la masa, y la fuerza centrífuga, que depende de la velocidad de rotación. Si el cuerpo gira con una rapidez superior a cierta velocidad máxima, se disgrega por efecto de su propia fuerza centrífuga. Esto implica, pues, que ha de existir un valor mínimo para el período de rotación, teniendo en cuenta que el valor del período mínimo P_m es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la densidad del cuerpo ρ. Aplicando esta relación, se demuestra que, para que una estrella pueda girar con un período de pocos milisegundos, como el que se observa en algunos púlsares, debe tener una densidad del orden de 10^{14} g/cm^3. Una densidad tan elevada sólo puede ser igual a la del núcleo atómico. Un ejemplo: esta densidad correspondería a una masa igual a la del Everest concentrada en un volumen equivalente al de un terrón de azúcar.

1 Núcleo
2 Flujo de neutrones
3 Corteza sólida
4 Eje de rotación
5 Partículas saturadas
6 Líneas del campo magnético
7 Emisión púlsar

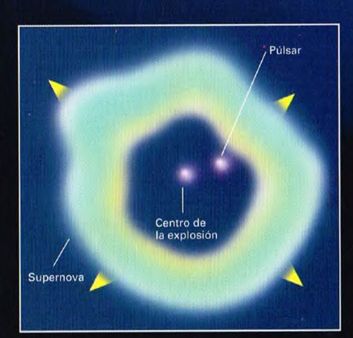
LAS ESTRELLAS DE NEUTRONES

Según las teorías de los astrofísicos, estas características corresponden a las de un tipo único y concreto de estrellas, cuya existencia, a partir de los años treinta, era sólo una suposición: las estrellas de neutrones. Una estrella de neutrones es un objeto con una masa comprendida entre 1,5 y 3 veces la masa del Sol, aproximadamente, pero con un radio de sólo 10 km. Las estrellas de neutrones son objetos constituidos esencialmente por neutrones, unas partículas elementales carentes de carga eléctrica que, junto con los protones, forman el núcleo de cualquier especie atómica. A causa de las elevadas temperaturas del interior de las estrellas (decenas de millones de grados), la materia se encuentra en forma ionizada, es decir, los electrones están separados de los núcleos atómicos. En el interior de las estrellas de neutrones, las altas densidades favorecen las interacciones nucleares entre electrones *e* y protones *p* libres, los cuales reaccionan entre sí formando un neutrón *n* y un neutrino ν, según el esquema: $p + e \rightarrow n + \nu$.

Este proceso, llamado neutronización, prosigue hasta que la mayor parte del núcleo estelar está formada por neutrones. Las otras partículas que produce la reacción, los neutrinos (carentes de carga eléctrica y con una masa, como mucho, infinitesimal), atraviesan el núcleo de la estrella sin interaccionar con las otras partículas y escapan de su superficie para luego dispersarse por el espacio.

EL ORIGEN DE LAS ESTRELLAS DE NEUTRONES

Naturalmente, las estrellas de neutrones no nacieron tal como nosotros las observamos, sino que son el resultado final del proceso evolutivo de una estrella de gran masa (M > 10 masas solares). Como es sabido, la vida de una estrella depende de un delicadísimo equilibrio entre gravedad



A la izquierda, debido a la fuerza de la explosión, el púlsar es lanzado al espacio a velocidades del orden de algunos centenares de km/s, lo que hace que se aleje cada vez más del lugar donde se originó. Este efecto es perfectamente medible en el caso de los púlsares más próximos, cuyos datos radio muestran un desplazamiento constante respecto a las fuentes de referencia. En cambio, éstas aparecen inmóviles.



AGONÍA DE LAS ESTRELLAS

Las estrellas de masa intermedia viven centenares de millones o miles de millones de años. Cuando han consumido su combustible, concluyen su existencia de una manera más o menos destructiva, según cuál sea su masa. Los púlsares y las estrellas de neutrones son, en cierto modo, los restos agonizantes de estrellas masivas.

y presión. Una estrella de gran masa ($M > 10\ M_{Sol}$), después de haber pasado por todos los ciclos de fusión posibles, ve destruido este delicado equilibrio. Al disminuir su combustible nuclear, la atracción gravitatoria domina, y la estrella empieza a contraerse rápidamente. El calentamiento súbito que esto origina induce reacciones nucleares incontrolables que provocan una violenta explosión: la muerte de la estrella es inevitable. Durante estas explosiones, se libera en pocos segundos una cantidad de energía comparable a la que la propia estrella ha emitido a lo largo de toda su vida, y esto se manifiesta en el cielo en forma de destellos de una luminosidad intensísima, visibles a simple vista incluso en pleno día: son las supernovas. Después de la explosión, mientras las capas más externas de la estrella son arrojadas al espacio, el núcleo sufre lo que se llama un colapso gravitacional.

En el dibujo a toda página, los púlsares poseen un campo magnético muy elevado que invade el espacio que los rodea. Las líneas de campo se establecen a partir de dos regiones simétricas –los polos magnéticos– respecto al centro de la estrella.

LA EMISIÓN DE LOS PÚLSARES

En una estrella normal, la emisión luminosa está alimentada por las reacciones nucleares de fusión que tienen lugar en su núcleo. Después de estas reacciones, núcleos más ligeros se combinan entre sí para formar núcleos más pesados. La diferencia entre la masa total de los núcleos que reaccionan y la de los productos, conocida como defecto de masa, se transforma en energía según la relación de Einstein $E = m \cdot c^2$. Luego, la energía producida se libera en forma de radiación electromagnética que, después de atravesar el interior de la estrella, es irradiada al espacio. En una estrella de neutrones, los procesos de fusión nuclear ya no están activos y, por tanto, el interior de la estrella no produce energía. En efecto, la emisión electromagnética de los púlsares no se origina en el interior de la estrella de neutrones, sino en el exterior, en las regiones cercanas a su superficie. En realidad, una estrella de neutrones posee un campo magnético muy intenso –millones de veces más fuerte que el del Sol– que penetra en el espacio circundante y crea una región de influencia llamada magnetosfera. La estrella de neutrones emite hacia la magnetosfera enormes cantidades de electrones

EL NOMBRE DE LOS PÚLSARES

Los púlsares se identifican con una sigla universal formada por las letras PSR (de PulSaR) y una secuencia de números que representa, en una primera aproximación, su posición en el firmamento expresada en ascensión recta y declinación. Así, el púlsar descubierto por J. Bell (PSR 1919+21) se encuentra a 19 horas y 19 minutos de ascensión recta, y +21° de declinación. Desde 1967 hasta hoy, la búsqueda de otros púlsares se ha intensificado y ha permitido nuevos y rápidos descubrimientos. Actualmente, los púlsares identificados son unos 700, localizados prácticamente todos en nuestra Galaxia. Recientemente, un grupo de investigación de la Universidad estadounidense de Princeton ha compilado un catálogo de todos los púlsares conocidos, accesible vía Internet. Para consultar, basta conectar con la dirección http://pulsar.princeton.edu e indicar en la casilla apropiada el nombre del púlsar que interesa (por ejemplo PSR 0531+21). Así se obtendrá toda la información disponible.

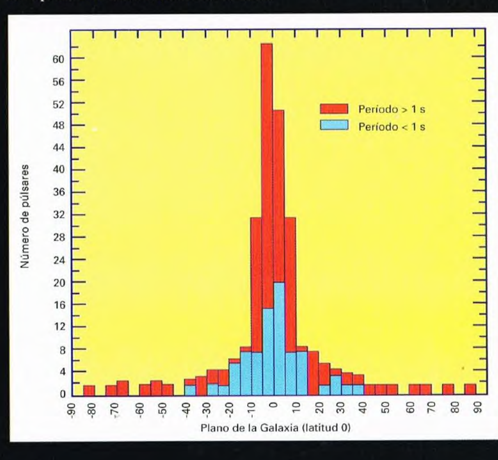
y positrones que se aceleran por su propia rotación a velocidades próximas a las de la luz. El campo magnético de la estrella de neutrones influye en el movimiento de estas partículas, que tienden a moverse a lo largo de sus líneas de fuerza siguiendo una trayectoria en espiral. De este modo, las partículas emiten parte de su energía cinética en forma de radiación electromagnética, llamada radiación sincrotón.

LA RESERVA DE ENERGÍA DE LOS PÚLSARES

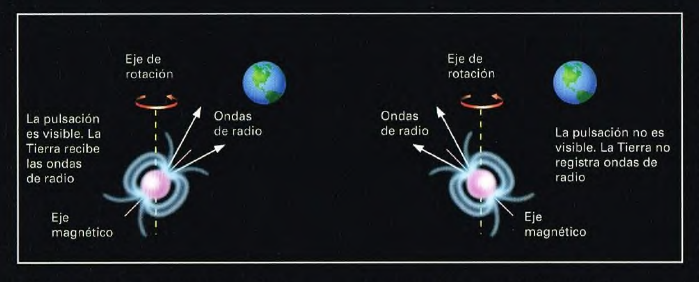
La emisión electromagnética de un púlsar se produce a expensas de la energía rotacional de la estrella de neutrones, la cual depende de su masa *M*, del radio *R* y del período de rotación *P*, según la relación: $E = (1/2) \cdot MR^2 \cdot (2\pi/P)^2$.

Una pérdida de energía rotacional implica un aumento del período de rotación y, por tanto, un ritmo más lento en el tiempo. Ésta es la explicación física de la disminución observada en el período de pulsación de los púlsares. Naturalmente, el índice de disminución del ritmo de un púlsar será más rápido cuanto mayor sea la cantidad de energía rotacional disipada por unidad de tiempo. Así, pues, los púlsares más viejos son también los que tienen un período de pulsación más largo. La relación entre el período de un pulsar y el doble de su índice de disminución de ritmo define la edad del púlsar. Pero no siempre el período de pulsación de un púlsar varía de manera regular. En efecto, en algunos casos, estos relojes cósmicos sufren bruscas aceleraciones para luego continuar su evolución de una manera casi regular. Tales fenómenos se designan con la palabra inglesa *glitches*, y son el resultado de microsismos que ocurren en la estructura externa de la estrella de neutrones: son auténticos estrellamotos que provocan una reacomodación del movimiento de rotación de la estrella de neutrones y, por consiguiente, de su período. Este tipo de fenómenos se manifiesta con especial frecuencia en el púlsar PSR 0833-45, llamado también

Arriba, distribución de los púlsares dentro de nuestra Galaxia. La posición de cada objeto se expresa en coordenadas galácticas. Se ve claramente una concentración mayor a lo largo del plano de la Galaxia (latitud 0).



A la derecha, el gráfico presenta la distribución de los púlsares en función de la latitud galáctica. En el dibujo también pueden apreciarse los púlsares con período menor y mayor de un segundo.



Al lado, la mayor parte de la radiación electromagnética emitida por los púlsares se produce en las proximidades de sus polos magnéticos, lo que provoca el fenómeno aparente de las pulsaciones. En efecto, si el eje del campo magnético de la estrella de neutrones no está alineado con su eje de rotación, los polos magnéticos giran alrededor del eje de rotación. Con ello, el haz de radiación que se produce barre el espacio circundante, interceptando periódicamente la Tierra con un período igual al de rotación de la estrella de neutrones. Esto es exactamente lo que sucede con la luz emitida por un faro, fenómeno llamado precisamente efecto faro. Por ejemplo, si pudiéramos ver el púlsar del Cangrejo, observaríamos que desaparece y reaparece con un período de 33 milisegundos.

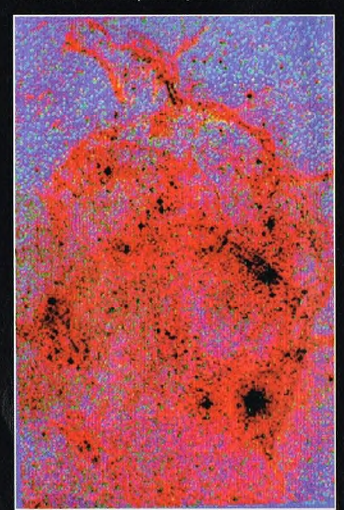
púlsar de la Vela por su posición en el interior del resto de la supernova homónima.

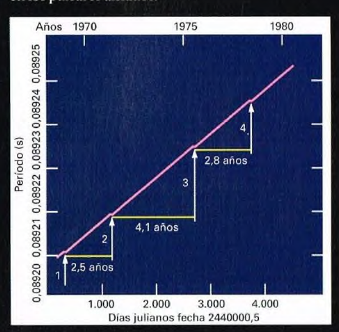
LA DETERMINACIÓN DE LA DISTANCIA

La distancia a los púlsares se determina con la medida de su emisión electromagnética a diferentes frecuencias radio. En particular, se observa que los impulsos radio aparecen retardados si se observan a frecuencias diferentes. Este fenómeno se debe a la interacción de la radiación electromagnética procedente del púlsar con el medio interestelar, y su entidad depende de la cantidad de materia presente a lo largo de la línea de visión. Así, midiendo el retardo de los impulsos a dos frecuencias distintas, es posible calcular la densidad de materia que hay en el medio interestelar entre la Tierra y el púlsar y, con ello, calcular la distancia.

La emisión radio de los púlsares no continúa indefinidamente, sino que después de un período de tiempo del orden de algunas decenas de millones de años el púlsar ha disipado buena parte de su energía rotacional, y su emisión electromagnética se debilita cada vez más hasta que no es prácticamente detectable. Pero, curiosamente, en algunos casos se observan estrellas de neutrones de edad muy superior, aunque todavía activas como púlsares radio, y con períodos de rotación excepcionalmente breves, del orden de unas pocas milésimas de segundo. Por este motivo, se llaman púlsares de milisegundos o ultrarrápidos. A diferencia de la mayor parte de los púlsares que se han observado, no son objetos aislados, sino que se encuentran en sistemas binarios, es decir, giran alrededor de una estrella compañera. En tales condiciones, es posible que la estrella de neutrones interaccione gravitacionalmente con esta compañera robándole materia. La materia que cae sobre la estrella de neutrones acelera el movimiento de rotación de esta última, con lo que su período se va haciendo progresivamente menor, al contrario de lo que ocurre en los púlsares aislados.

Fotografía de una parte del remanente de supernova en la Vela. Las estrellas progenitoras de estos objetos se transforman a veces en púlsares y en estrellas de neutrones.





Variación del período del púlsar de la Vela en un tiempo de unos 10 años. Los escalones del gráfico indican un aumento de la velocidad de rotación debido a un glitch.

EL COCHERO

La constelación del Cochero, o Auriga, tiene la forma de un gran pentágono que, en las noches de invierno, destaca en lo alto del cielo.



A comienzos del mes de diciembre, una estrella amarilla se presenta, altísima, en el firmamento: es Alfa, o Capella, la estrella más luminosa de la constelación del Cochero.

CÓMO LOCALIZAR LA CONSTELACIÓN

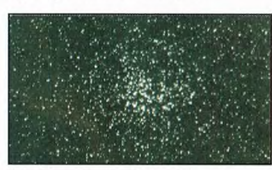
Para localizar el Cochero puede seguirse la larga alineación de estrellas brillantes que parte del lado más septentrional del Cuadrado de Pegaso, para continuar luego con Beta y Gamma *Andromedae* y, sobrepasando Alfa *Persei*, llegar hasta Capella. Esta estrella constituye el vértice septentrional de un pentágono bastante luminoso en el cual, sin embargo, la estrella situada más al sur forma parte de la contigua constelación de Tauro.

ESTRELLAS NOTABLES

De Capella (magnitud 0,1), la cabrita, sabemos hoy que, en realidad, está formada por un par de estrellas demasiado próximas entre sí para poderse separar incluso con el telescopio más potente.

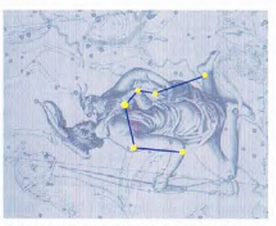
En el Cochero hay otras estrellas dobles de características singulares: Beta (magnitud 1,9), o Menkalinan, los Hombros del Cochero, está formada por dos estrellas muy cercanas, imposibles de resolver con telescopios. Periódicamente se eclipsan de manera alternativa, haciendo variar la magnitud a una décima parte aproximadamente en cuatro días. En cambio, con un pequeño telescopio puede verse una compañera suya (magnitud 10,4) situada a unos 3', mientras que un instrumento de apertura superior a los 30 cm muestra otra compañera mucho más débil (magnitud 14,9) y próxima, a menos de 13 segundos.

Pero la rareza de la constelación es Épsilon, otra binaria de eclipse, cuya magnitud varía de 2,9 a 3,8 en 27 años. Los eclipses duran aproximadamente un año; los descensos hacia el mínimo de luminosidad y las recuperaciones hacia el máximo se producen muy lentamente, lo que indica que al menos una de las dos estrellas que participan en el eclipse posee una envoltura espesa que oculta lentamente a la compañera. Las dimensiones de estos dos astros son considerables, equivalentes, respectivamente, a más de 1,5 unidades astronómicas para el más masivo y a más de 10 unidades astronómicas para el de menor masa, que orbita alrededor del primero.



De todos los cúmulos abiertos de la constelación del Cochero, M37 es seguramente el más bello, además de ser el más luminoso.

AE es una estrella variable de modo irregular entre las magnitudes 5,8 y 6,1. Lo mismo que 53 *Arietis* y Mu *Columbae*, procede de la nebulosa de Orión, pero se aleja de ella a una velocidad de 130 km/s.



El Cochero está representado con una cabrita en su espalda. Se trataría del rey de Atenas Eritonio, inventor de la cuadriga, con la cabra que alimentó a Júpiter cuando era niño.

OTROS OBJETOS DEL COCHERO

Debido a su posición en las cercanías de la Vía Láctea, el Cochero es una constelación con abundantes cúmulos abiertos.

Uno de ellos es M36, observable incluso con unos gemelos. Los instrumentos pequeños muestran algunas decenas de estrellas blancas de formación reciente. Las estrellas más brillantes del cúmulo están comprendidas dentro de unos 10 segundos.

M37 es mayor y más luminoso que el anterior. Está formado por 150 estrellas que hacen que la luminosidad total del cúmulo esté alrededor de la sexta magnitud. Para una observación mejor, es necesario un instrumento de unos 10 cm de apertura.

M38, el último de los objetos de Messier de esta constelación, es también un cúmulo abierto, compuesto por un centenar de estrellas que se encuentran en una zona de firmamento de unos 20' de diámetro. Lo mismo que M36 y M37, es perceptible con gemelos, pero los instrumentos más potentes permiten observar con mayor detalle los astros que lo forman.

LOS MITOS Y LAS ESTRELLAS

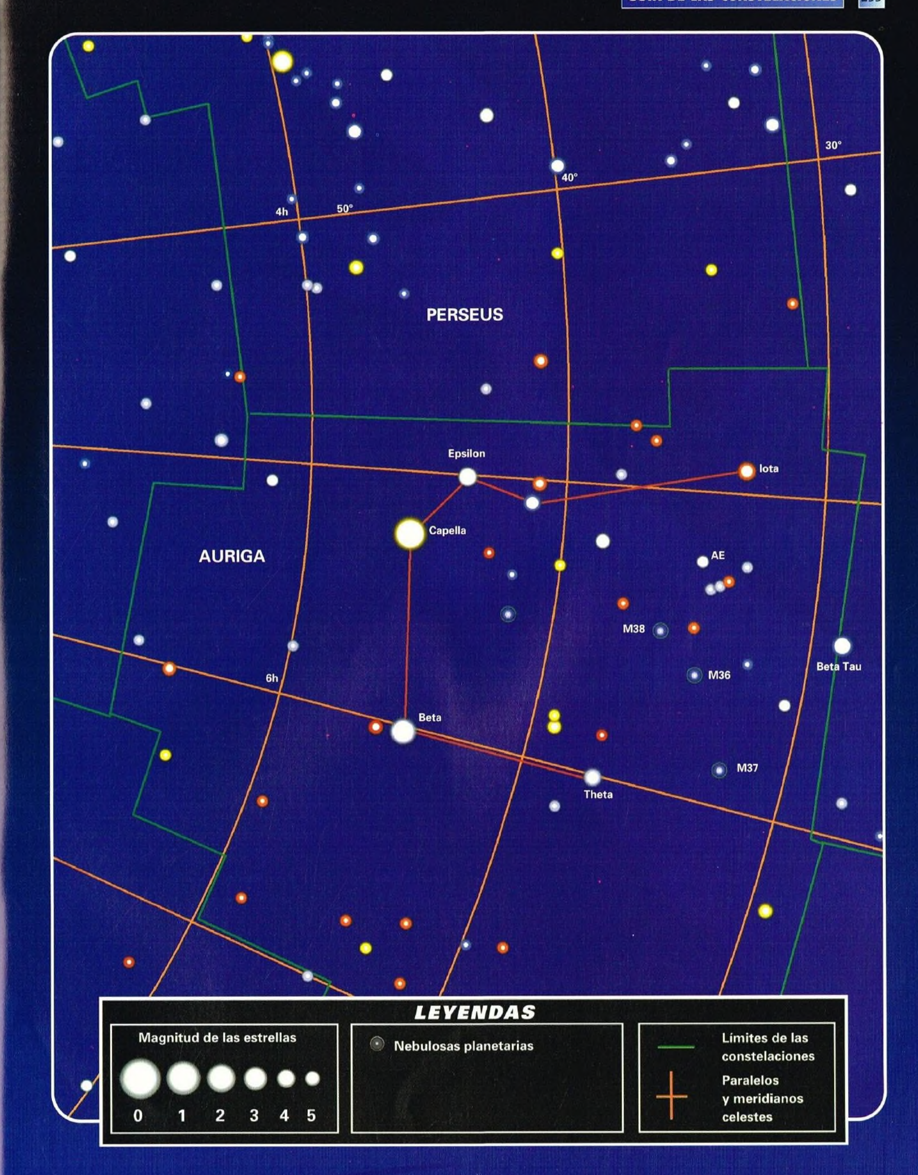
EL COCHERO

Este grupo es bien conocido desde la Antigüedad más remota.
Según una antigua tradición, Capella sería Amaltea, la ninfa que cuidó a Júpiter cuando era niño y vivía junto a los pastores del monte Ida. Su madre, Gea, lo había escondido allí para librarlo de la voracidad de su padre, Saturno, que devoraba a sus hijos apenas habían nacido. Amaltea hizo que una cabrita alimentara a Júpiter, por lo que el dios quiso recompensarla poniéndola en el cielo. Según una versión algo distinta, Amaltea era una cabrita que alimentó a Júpiter. En este caso, la identificación con Capella es más directa.

DÓNDE BUSCARLA

EL COCHERO

Abarca una región del cielo comprendida entre 25° N y 55° N de declinación, y entre 4 horas 30 minutos y 7 horas 30 minutos de ascensión recta, aproximadamente. En latitudes mediterráneas, el Cochero culmina en el cenit alrededor de las 21 horas a mediados de enero. Limita al norte con la constelación de la Jirafa, al noroeste con el Lince, al sur con Géminis y Tauro, y al oeste con Perseo. Capella, la estrella más brillante, es circumpolar para latitudes superiores a 45° N.


30°
40°
4h
50°
PERSEUS
Epsilon
Iota
Capella
AURIGA
AE
M38
Beta Tau
M36
6h
Beta
M37
Theta
LEYENDAS
Magnitud de las estrellas
0 1 2 3 4 5
Nebulosas planetarias
Límites de las constelaciones
Paralelos y meridianos celestes

LOS VIKING, EN BUSCA DE LA VIDA

Dos sondas lanzadas en 1975 deberían haber dado una respuesta definitiva a la antigua pregunta: «¿Hay vida en Marte?». La respuesta, aun dejando una pequeñísima duda, ha sido negativa. Pero estas sondas han permitido obtener informaciones sobre las características del planeta rojo.



Las sondas Viking, provistas de los instrumentos electrónicos más sofisticados, tenían una cosa en común con los antiguos vikingos: el deseo de descubrimientos y aventuras.

La preparación de las misiones empezó en 1968, mucho antes del épico viaje del Mariner 9, construido también para la exploración de Marte.

Las dos sondas, Viking 1 y Viking 2, se construyeron en base al modelo, ya experimentado, del Mariner 9.

Sin embargo, la gran diferencia consistía en que las Viking estaban dotadas de dos módulos distintos, uno que debía orbitar alrededor del planeta y otro que debía posarse en su superficie.

Ambos módulos permanecieron unidos durante el largo viaje de la Tierra a Marte y, también unidos, efectuaron las primeras órbitas alrededor del planeta para examinar con atención los lugares de aterrizaje, ya elegidos a partir de las fotografías que anteriormente había transmitido el Mariner 9, pero que debían ser evaluados momentos antes de que el módulo se posara en el suelo. Sólo cuando se tuvo una completa seguridad del lugar, se tomó la decisión de separar los módulos e iniciar la delicada fase de aterrizaje.

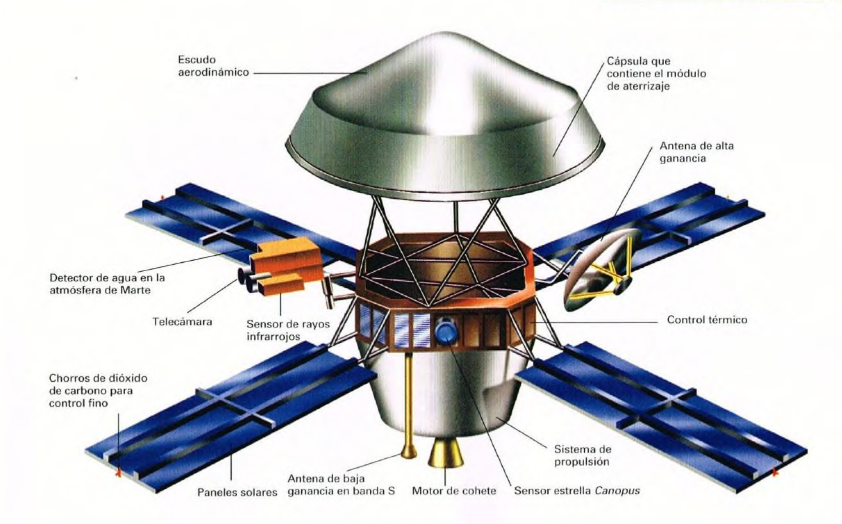
EL VIAJE DEL VIKING 1

Sin duda, era un gran paso adelante respecto a las tentativas de aterrizaje soviético que fracasaron. Los soviéticos habían construido cápsulas que, una vez lanzadas desde la Tierra, no podían ser guiadas y debían «hacer diana» mirando el lugar de aterrizaje en Marte directamente desde la Tierra, mientras que los estadounidenses, para hacer la observación, esperaron a que el blanco estuviera próximo y «a tiro».

La Viking 1 se lanzó el 20 de agosto de 1975 y, después de un viaje de 10 meses por el espacio, entró en órbita marciana el 19 de junio de 1976. Según el plan original, la sonda espacial debería haber orbitado el planeta durante dos semanas, examinando atentamente su superficie, y aterrizar en ella el 4 de julio, día del bicentenario de la Declaración de la Independencia Americana. Pero el proyecto no fue respetado, ya que el lugar de aterrizaje resultó más accidentado de lo previsto, y el peligro de que el módulo quedara dañado al posarse en el suelo era demasiado grande para correr riesgos. Por esto se decidió cambiar el lugar, lo que motivó un retraso respecto a la fecha prevista. Ambos módulos permanecieron unidos hasta el 20 de julio, cuando se tomó la decisión de intentar el aterrizaje en una zona al noroeste de la elegida anteriormente. La sonda orbitante giraba alrededor de Marte a una velocidad cercana a los 5 km/s. Después de una larga serie de maniobras cuidadosamente programadas para desacelerar el módulo de aterrizaje, éste tocó la superficie a una velocidad inferior a los 3 m/s. El módulo de aterrizaje estaba protegido por un escudo aerodinámico llamado *aeroshell*, capaz de mantener estable el descenso, disminuyendo su velocidad y, al mismo tiempo, disipando el calor generado durante el paso a través de la tenue atmósfera de Marte. La sonda fue desacelerada a una altura comprendida entre 30 y 24 km de la superficie. Cuando se hallaba apenas a 6 km de ella, el módulo de aterrizaje viajaba todavía a 250 m/s y estaba programado para que a aquella altura se abriera un paracaídas que hiciera más lento el descenso a través de la zona atmosférica más densa. En aquel punto, el escudo aerodinámico resultaba inútil, por lo que fue abandonado. El módulo de aterrizaje permaneció suspendido del paracaídas sólo durante 45 s hasta llegar a 1.200 m de altura,



A la derecha, momento del lanzamiento desde cabo Cañaveral del Titan Centaurus que llevaba a bordo la sonda Viking 1.



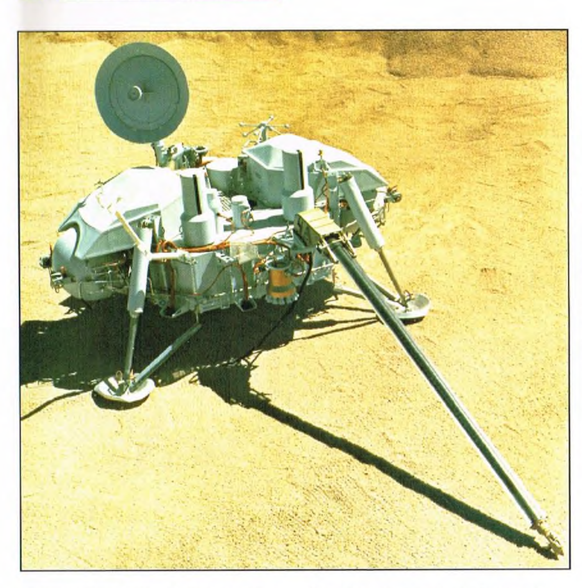
cuando la velocidad se había reducido a 60 m/s. Entonces, el paracaídas se separó y se encendieron brevemente tres cohetes para frenar el módulo hasta la superficie (por efecto de la baja presión atmosférica de Marte, y a diferencia de lo que ocurre en la Tierra, el paracaídas no habría podido aminorar suficientemente la velocidad del módulo). El trayecto de descenso desde la entrada en la atmósfera hasta el aterrizaje duró unos 10 m. En este corto tiempo, fueron sometidos a una dura prueba tanto los conocimientos de aerodinámica como los de la atmósfera marciana. Pero todo funcionó a la perfección. En el momento de aterrizar el Viking 1, Marte se hallaba a unos 340 millones de km de la Tierra, por lo que los controladores de la misión en Pasadena (California) tuvieron que esperar 19 larguísimos y enervantes minutos antes de recibir las señales electrónicas que confirmaban el éxito de la operación. A las 5.12 horas de Pasadena, del 20 de julio de 1976, en las pantallas de la sala de control apareció la esperada palabra codificada: ENABLED. Esto significaba que los motores terminales de descenso se habían apagado y que la Viking 1 había aterrizado a la perfección. Pocos instantes después, los controladores de la misión, en el colmo del entusiasmo, ya estaban estudiando las primeras fotografías del suelo de Marte tomadas directamente desde el módulo de aterrizaje. Unas dos semanas más tarde, el 4 de septiembre, el mismo grupo de científicos y técnicos volvió a exultar cuando la Viking 2 efectuó un aterrizaje perfecto y empezó a enviar un nuevo flujo de fotografías. Otro motivo de satisfacción fue la prolongación de la misión nominal, que debería haber acabado en diciembre de 1976, cuando Marte se hallaría detrás del Sol. Pero, en la reaparición del planeta, todo el equipo continuaba funcionando perfectamente, y fue entonces cuando se decidió prolongar la misión hasta 1979.

EL EXPERIMENTO PARA LA BÚSQUEDA DE VIDA

Uno de los objetivos más importantes de las misiones Viking era dar una respuesta definitiva al problema de la existencia de vida en Marte. Los datos científicos obtenidos antes de las misiones Viking ya habían demostrado exhaustivamente que las probabilidades de encontrar organismos de dimensiones y complejidad similares a los terrestres eran inexistentes, pero, *a priori*, no podía excluirse la existencia de formas de vida mucho más simples. Los factores principales que excluían la vida biológica superior eran cuatro: 1) una atmósfera demasiado tenue y carente de oxígeno; 2) la falta de agua líquida en la superficie; 3) la temperatura demasiado baja para un metabolismo normal; 4) la intensidad de la radiación ultravioleta del Sol. Evidentemente, no habían faltado los que,

Arriba, dibujo de la sonda Viking. Pueden observarse los paneles solares y la antena de transmisión.

dotados de una gran fantasía, habían imaginado criaturas basadas en principios orgánicos diferentes, capaces de superar circunstancias adversas y sobrevivir en tales condiciones. Pero no vale la pena hablar de ello, ya que se trata solamente de novelas de ciencia ficción. En cambio, la búsqueda de una vida mucho más primitiva fue tomada seriamente en consideración, y en las Viking se instalaron sofisticados aparatos detectores. Las telecámaras, sin embargo, no revelaron ningún indicador de movimiento, lo que hizo que se descartara la posibilidad de que en las proximidades de los puntos de aterrizaje existieran organismos móviles, por pequeños que fueran. Pero hay que recordar que la zona observada por las Viking no iba más allá de cuatro diezmillonésimas de la superficie total. Si los aparatos fotográficos parecían rechazar inequívocamente la existencia de vida en Marte en aquella zona, los biólogos que seguían el proyecto Viking esperaban tener la respuesta definitiva de los análisis programados en los módulos de aterrizaje. El resultado más simple podía obtenerse con los espectrómetros de masa del cromatógrafo de gases (GCMS). Estos instrumentos, cuya misión era buscar componentes orgánicos en las muestras de suelo, estaban en condiciones de detectar



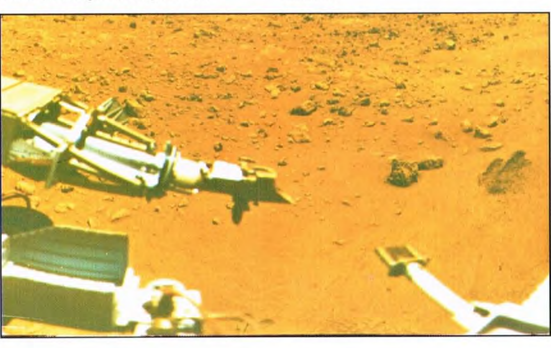
Arriba, módulo de trabajo de la sonda Viking, proyectada para el aterrizaje en la superficie de Marte.

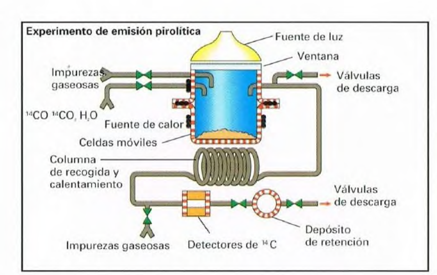
la presencia de moléculas orgánicas en un porcentaje de sólo unas pocas partes por mil millones. Instrumentos similares habían conseguido detectar más de 20 componentes orgánicos en la Antártida, cuyo medio ambiente es considerado el más estéril de la Tierra (con un contenido de algunos centenares de microorganismos por gramo). Pero en los módulos de aterrizaje Viking 1 y Viking 2, los instrumentos GCMS no encontraron nada.

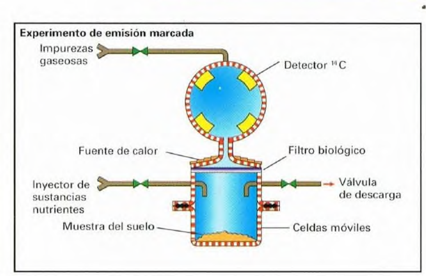
¿PRUEBAS DECISIVAS?

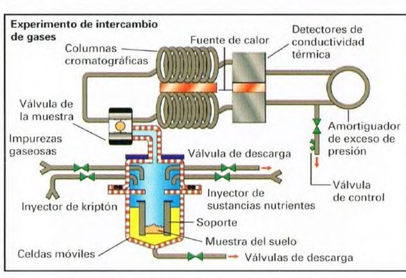
El resultado fue el golpe de gracia para todos los que todavía continuaban sosteniendo la existencia de vida en Marte, ya que, a diferencia de los demás datos experimentales, no era fácil conciliar el resultado obtenido por los GCMS con la vida en el planeta. La única manera de explicar la ausencia de material orgánico, tanto en organismos vivos como en restos dejados por organismos anteriores, era admitir que los seres vivos de Marte son unos necrófagos tan eficientes que eliminan todos los restos orgánicos de sus antecesores y los de sus propias sustancias metabólicas. También debería suponerse que, en todo momento, la masa de material vivo es muy pequeña. Muchas y fundadas son las objeciones a esta hipótesis. En primer lugar, cabría haber esperado que los instrumentos GCMS hubieran detectado compuestos orgánicos de naturaleza no biológica cuyo origen estuviera en fuentes diversas, entre ellas –y seguramente la principal–, el espacio interestelar. Algunos tipos de meteoritos contienen compuestos orgánicos de carbono y, sin duda, también en Marte caen meteoritos así. El hecho de que no se hayan encontrado compuestos de este tipo muestra que debe existir un proceso que los destruye; pero lo más probable es que se trate más de un proceso inorgánico físico o químico que de un proceso biológico (por ejemplo, sería suficiente una fuerte radiación ultravioleta). Los otros tres experimentos biológicos dieron resultados todavía más desconcertantes. Al principio, uno de ellos parecía indicar la existencia de actividad biológica. Los tres experimentos se habían concebido según un mismo esquema: tomar una muestra de suelo con los presuntos microorganismos marcianos, ponerlos en un ambiente o cultivo favorable y observar las consecuencias. El experimento de emisión pirolítica consistía en exponer pequeñas muestras de suelo a una atmósfera similar a la de Marte, que contuviera monóxido y dióxido de carbono «marcados» con el isótopo radiactivo del carbono, es decir, el carbono 14. Durante un período de incubación de cinco días, la muestra, aunque iluminada con una luz como la que llega a la superficie de Marte, estaba protegida de las radiaciones ultravioleta nocivas: de haber habido algún organismo, en el período de incubación hubiera asimilado el carbono y, especialmente, el isótopo 14. El quinto día, la muestra se calentó intensamente hasta 625 °C, de manera que las células de los eventuales microorganismos quedaran destruidas y la sustancia orgánica vaporizada. Los gases vaporizados, al pasar por un detector apropiado, tendrían que haber registrado la presencia radiactiva del carbono si éste hubiera sido utilizado por

Abajo, el brazo de la Viking 1 que sirvió para tomar y luego analizar muestras de la superficie de Marte.

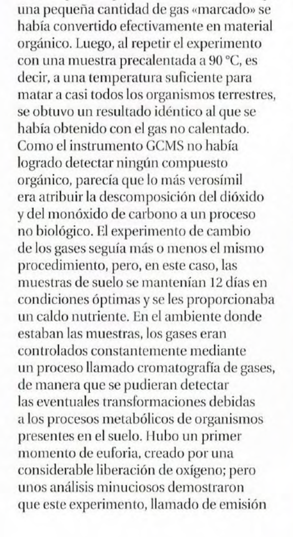






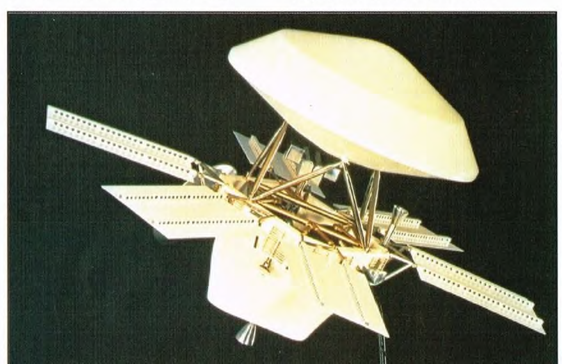


Arriba y a la izquierda, tres dibujos que esquematizan algunos experimentos biológicos a bordo de las Viking, que sirvieron para los análisis y la búsqueda de eventuales formas de vida elemental.



algún organismo en su proceso metabólico. Pero lo que el experimento demostró fue que una pequeña cantidad de gas «marcado» se había convertido efectivamente en material orgánico. Luego, al repetir el experimento con una muestra precalentada a 90 °C, es decir, a una temperatura suficiente para matar a casi todos los organismos terrestres, se obtuvo un resultado idéntico al que se había obtenido con el gas no calentado. Como el instrumento GCMS no había logrado detectar ningún compuesto orgánico, parecía que lo más verosímil era atribuir la descomposición del dióxido y del monóxido de carbono a un proceso no biológico. El experimento de cambio de los gases seguía más o menos el mismo procedimiento, pero, en este caso, las muestras de suelo se mantenían 12 días en condiciones óptimas y se les proporcionaba un caldo nutriente. En el ambiente donde estaban las muestras, los gases eran controlados constantemente mediante un proceso llamado cromatografía de gases, de manera que se pudieran detectar las eventuales transformaciones debidas a los procesos metabólicos de organismos presentes en el suelo. Hubo un primer momento de euforia, creado por una considerable liberación de oxígeno; pero unos análisis minuciosos demostraron que este experimento, llamado de emisión «marcada», daba también unos resultados negativos. Una vez más, las muestras de suelo se dispusieron en condiciones óptimas y se les adicionó un rico caldo nutriente, en el cual los compuestos de carbono contenían el isótopo 14 radiactivo. Si en la muestra hubieran existido organismos, tendrían que haber absorbido el caldo nutriente y liberado, mediante sus procesos metabólicos, gases con cierto contenido de carbono y metano. Las muestras de suelo se incubaron en el caldo nutriente durante períodos de hasta 11 días, con valores de liberación de gases correspondientes a los de materiales terrestres completamente esterilizados. También en este caso, las respuestas fueron absolutamente negativas. A pesar de que no es difícil explicar algunos de los resultados obtenidos con experimentos bioquímicos inventando extraños organismos marcianos, parece mucho más probable que la química inorgánica superficial de Marte sea decididamente anómala o, al menos, mucho más anómala de lo que se había pensado cuando se proyectaron los experimentos. Para demostrarlo, se efectuaron en tierra una serie de comprobaciones que pretendían lograr una réplica de los resultados obtenidos en los módulos de aterrizaje. Después de estos estudios se llegó a una conclusión: el suelo superficial de Marte podría contener compuestos fuertemente oxidantes, como los peróxidos y los superóxidos, que reaccionan activamente (y de manera no biológica) cuando están en contacto con líquidos acuosos. Compuestos de este tipo podrían haber sido producidos por la interacción de la intensa radiación ultravioleta procedente del Sol con la atmósfera y el suelo.

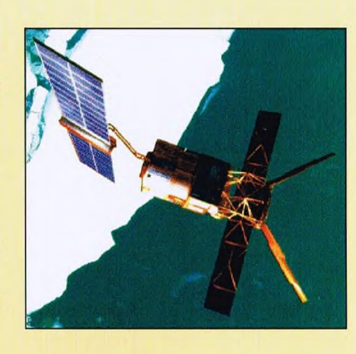
Abajo, la sonda Viking. A veces, las sondas espaciales se lanzan de dos en dos para evitar los perjuicios de una eventual avería.



ERS-1 Y ERS-2

DOS SATÉLITES EUROPEOS GEMELOS PARA EL ESTUDIO DEL PLANETA TIERRA

El modo más eficaz de estudiar el medio ambiente terrestre es poner en órbita satélites que puedan tenerlo constantemente bajo control. El ERS-1 y el ERS-2, los primeros satélites de la Agencia Espacial Europea, están desarrollando a la perfección la misión que les fue confiada.



Arriba, representación pictórica del satélite ERS-1, utilizado para el estudio de las características de la superficie y la atmósfera terrestres.



El clima de nuestro planeta es un sistema muy complejo. Está influido por la órbita de la Tierra alrededor del Sol, las variaciones del propio Sol, los lentos –aunque importantes– cambios geológicos que se manifiestan en la superficie del planeta y también por otro factor, aunque no el último, la acción del hombre. Hoy más que nunca necesitamos comprender a fondo el funcionamiento de este sistema para conocer los cambios climáticos que se producen y saber si el hombre tiene una responsabilidad real notable en todo ello. Desde el espacio se pueden controlar las menores variaciones climáticas no sólo con precisión, sino también con continuidad. De ahí la importancia de los satélites ambientales. Han pasado siete años desde que, en la mañana del 17 de julio de 1991, el satélite ambiental ERS-1 (European Remote Sensing Satellite) fuera lanzado a una órbita polar desde la base de lanzamiento europea de Kurú, y han transcurrido algo más de tres años desde el lanzamiento de su gemelo, el ERS-2, efectuado el 21 de abril de 1995. Durante estos años, el ERS-1 y el ERS-2 nos han ofrecido una visión muy distinta de nuestra Tierra y de su ambiente.

CÓMO SE HICIERON

Los ERS son grandes satélites que en Tierra pesan más de dos toneladas. Tienen una altura de unos 12 m en su apertura máxima y transportan cargas útiles muy sofisticadas en su trayecto orbital, a 780 km aproximadamente de la superficie terrestre. Los principales instrumentos a bordo de los ERS son:

• el AMI (Active Microwave Instrument), que puede funcionar como radar de apertura sintética por microondas con el fin de obtener imágenes de alta resolución de las zonas costeras, oceánicas y polares, y como dispersómetro para medir velocidades y dirección del viento en la superficie oceánica;

• el RADAR ALTÍMETRO, un instrumento de nueva concepción en el momento del lanzamiento, está dotado de un sensor activo por microondas y observa la topografía y la dinámica de las superficies oceánicas y de los casquetes polares;

• el ATSR (Along-Track Scanning Radiometer and Microwave Sounder) es un instrumento que funciona en tres bandas del infrarrojo térmico y es capaz de medir las temperaturas superficiales de los océanos y la humedad de la atmósfera;

• además, el ERS-2 posee el Global Ozone Monitoring Experiment (GOME).

Estos instrumentos permiten obtener medidas exactas de la altura de la superficie del mar, la longitud de las olas, la temperatura del agua marina, la velocidad de los vientos y la temperatura de la parte más alta de las nubes y del vapor de agua de la atmósfera. Además, también pueden definir con gran precisión la posición de un punto en la superficie de la Tierra. Finalmente, el GOME ha sido construido para detectar la presencia de ozono en la totalidad de la alta atmósfera terrestre.

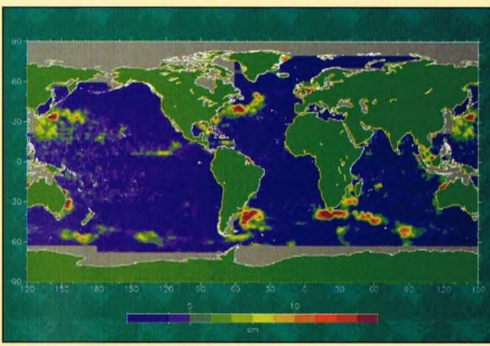
LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS

La interferometría SAR ha sido una novedad importante. Antes del lanzamiento del ERS-1, la técnica de procesamiento de las informaciones procedentes de dos o más imágenes radar de satélites de una misma zona para obtener informaciones o mapas tridimensionales era sólo una idea teórica. Hoy, los científicos están en condiciones de estudiar las características de la Tierra directamente desde el espacio, partiendo de perspectivas absolutamente nuevas. Se calculan las deformaciones de la superficie



A la izquierda, el satélite ERS-1, lanzado en 1991, orbita a 780 km de altura sobre la superficie terrestre.





terrestre causadas por los terremotos con una aproximación de unos pocos centímetros, la velocidad de desplazamiento de una masa de hielo en el Antártico –de más de 5 cm al día–, o se elaboran mapas topográficos tridimensionales a una escala muy grande: los llamados DEM (Digital Elevation Models), que, de otro modo, requerirían datos muy costosos tomados desde tierra. Efectivamente, los movimientos tectónicos de continentes enteros pueden observarse con la interferometría del ERS-1.

Arriba, mapa de la superficie terrestre trazado por los satélites ERS, con los que es posible obtener informaciones sobre las corrientes y los niveles marinos.

Arriba a la izquierda, un dibujo del satélite ERS-1. Su longitud total es de unos 12 m; abajo puede distinguirse la antena radar de 10 x 1 metros.

VER A TRAVÉS DE LAS NUBES

La naturaleza pone muchos obstáculos a las observaciones de la Tierra desde el espacio. Los sensores ópticos no pueden observar zonas como las selvas tropicales lluviosas, ocultas a menudo por una capa de nubes. En cambio, el haz de microondas del instrumento SAR de alta resolución de los ERS penetra a través de las nubes para ofrecer informaciones globales y detalladas sobre las zonas calificadas como «pulmones verdes» de nuestro planeta. Sin embargo, monitorizar solamente la deforestación no es suficiente. En un ecosistema tropical han de considerarse otros aspectos: repoblación forestal, tala selectiva de recursos y una sofisticada gestión de los bosques. Ahora se empieza a aprender de qué modo pueden extraerse informaciones de los datos de los ERS. La ESA y el Joint Research Centre de la Unión Europea llevan a cabo un amplio programa, el TREESI, cuya finalidad es obtener datos para un inventario de las selvas tropicales lluviosas que pueda irse actualizando.



Arriba, el ERS en el laboratorio, antes del lanzamiento.

EL CONTROL DE LOS MARES CONTAMINADOS POR EL PETRÓLEO

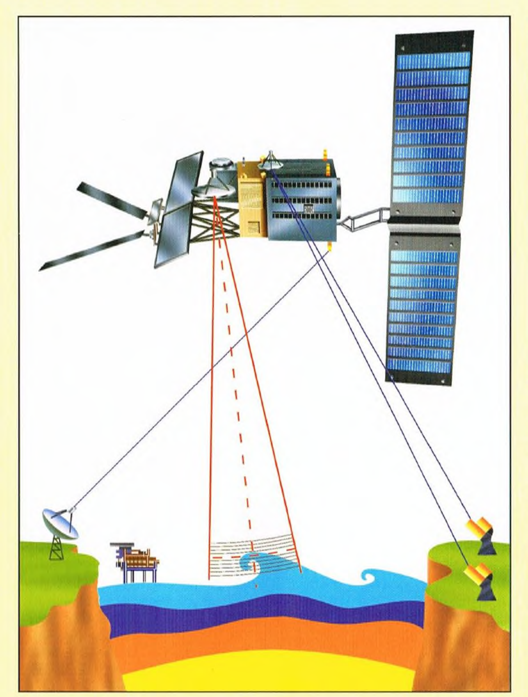
Las suposiciones sobre la capacidad del ERS-1 para detectar las manchas de petróleo en base al efecto alisante que éste produce en la superficie marina han quedado confirmadas por una serie de experimentos efectuados gracias a una oportuna reprogramación de las observaciones del satélite a consecuencia de incidentes sufridos por petroleros. Hoy, con el ERS-1 y el ERS-2, es posible tener bajo control la contaminación por petróleo, y las costas escandinavas son ya objeto de controles sistemáticos desde el espacio. El objetivo no es tanto estudiar las grandes catástrofes como identificar pequeños vertidos en el mar, clandestinos y a menudo ilegales, procedentes principalmente de la limpieza de contenedores de buques que, normalmente, se hace de noche.

CAMBIOS CLIMÁTICOS COMPLEJOS

Durante muchos años, los cambios climáticos han sido la preocupación principal de los científicos.
Y, sin embargo, todavía no estamos en condiciones de establecer con precisión cuándo y hasta qué nivel aumentará la temperatura de la Tierra. Tampoco conocemos el probable impacto local de un cambio climático global. Sin embargo, el clima nunca ha permanecido estable. Entre los elementos principales que pueden contribuir a conocer mejor nuestro clima cabe citar: las variaciones regionales (locales), como el fenómeno de El Niño, llamado también oscilación en el Pacífico del Sur. El ERS-1 ha proporcionado los modelos más detallados de acontecimientos como los de El Niño ocurridos entre 1991 y 1992, y entre 1997 y 1998. Para ello, trazó mes a mes un cuadro de las variaciones del nivel del mar y de la temperatura en su superficie durante todo el período. Esto ha permitido confirmar las teorías sobre el porqué de la aparición súbita de El Niño y el modo en que se desarrolla, así como identificar algunas características inesperadas.

ERS-1 Y ERS-2 EN TÁNDEM

El ERS-1 ya ha permanecido activo durante más del 100% de su duración operativa prevista y todavía



EL FONDO OCULTO DEL OCÉANO

El fondo del océano Ártico está sepultado bajo una capa de sedimentos de unos 5 km de espesor, sobre la cual hay otros 5 km de agua que, a su vez, están cubiertos en algunas zonas por una capa de hielo de algunos kilómetros. Es difícil imaginar que un satélite que dista 780 km de la Tierra pueda elaborar un mapa de la estructura topográfica del fondo del océano Ártico. Y, sin embargo, un grupo de científicos angloestadounidenses ha elaborado este mapa con el auxilio de los datos del altímetro del ERS-1. El mapa no sólo ha revelado la existencia de nuevos yacimientos minerales y quizá también petrolíferos, sino que, además, ha demostrado que la formación de una gran parte del fondo oceánico tuvo lugar hace algunos millones de años.

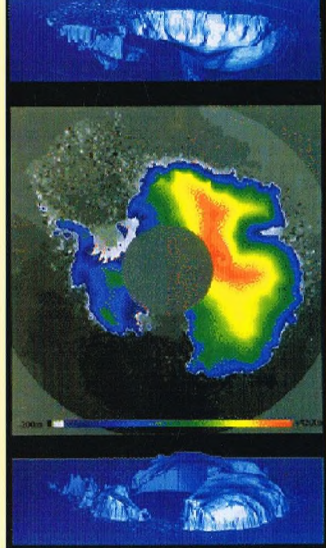
funciona perfectamente. Con el lanzamiento del ERS-2, la ESA ha querido garantizar la continuidad de los datos de teledetección a la gran comunidad de usuarios del sistema. El ERS-1 y el ERS-2 funcionaron en tándem durante unos nueve meses, hasta julio de 1996. Los objetivos de esta misión han sido observar una misma zona de la Tierra a un día de distancia o incluso dentro del mismo día con una diferencia de pocas horas. Esto ha servido no sólo para verificar el grado de fiabilidad de los instrumentos de los dos satélites, sino también para investigaciones de alta definición.

Arriba, esquema del modo operativo del ERS. Las ondas de radio emitidas por el satélite se reflejan en tierra y son recogidas nuevamente por el ERS.

LAS PEQUEÑAS DIFERENCIAS DE LOS GEMELOS

El ERS-2 es prácticamente una copia del ERS-1, con tres diferencias importantes: la primera es un instrumento, el GOME, construido expresamente para la medida global de los niveles de ozono en la atmósfera. La segunda es el radiómetro de infrarrojo, que posee tres canales adicionales en la parte visible del espectro electromagnético con el fin de optimizar el control sistemático de la vegetación; la tercera innovación consiste en una versión avanzada del instrumento PRARE, que proporciona medidas más exactas de la órbita del satélite.

El ERS-2 debería funcionar durante el período comprendido entre 1995 y 1998/99, pero si se comporta como el ERS-1, todavía estará en funcionamiento más allá del año 2000.



A la derecha, imagen de la región antártica reconstruida con los datos del ERS. Además del perfil de la zona, el satélite ha podido trazar su representación tridimensional.



EN EL PRÓXIMO NÚMERO

EL SISTEMA SOLAR

LAS ÓRBITAS DE LOS CUERPOS CELESTES

ESTRELLAS Y GALAXIAS

LA DISTANCIA DE LAS GALAXIAS

GUÍA DE LAS CONSTELACIONES

EL HORNO

CÓMO FUNCIONA EL UNIVERSO

LA LEY DE HUBBLE

LA EXPLORACIÓN DEL ESPACIO

MONTE WILSON Y MONTE PALOMAR

KONUS™

LOS SUPER TELESCOPIOS *En las tiendas de Foto Optica*

- *2000 Puntos de venta en toda España*
- *Extensa gama de instrumentos para la astronomía*
- *Asistencia técnica previa y posterior de la venta*
- *Garantia internacional*
- *2 Manuales para su uso*



Cuando adquieras un telescopio, es necesario haber sido asesorado; las tiendas de foto-óptica y nuestra Oficina están a tu disposición. Los dos manuales gratuitos te dan toda la información que necesitas para su uso. Verifica que el telescopio que has recibido tenga la marca y la garantia Konus. Para obtener la lista de vendedores más cercanos, o para cualquier información sobre nuestros productos, llama al número 91-6778663.



KONUS ESPAÑA S.L. - C/Caucho, 53 - 28850 TORREJON DE ARDOZ (MADRID)
Tel 91-6778663 - Fax 91-6778538

cod. 1735 KONUSTART-700 Ø60 mm F.700 f/11,6

EL TELESCOPIO ALTAZIMUTAL CON UNA GRAN DOTACION

CARACTERISTICAS TECNICAS: Optica entubada y colimada; montura altazimutal de horquilla; trípode en aluminio de dos secciones (de 69 a 116 cm). ACCESORIOS EN DOTACION: Dos oculares Ø24,5 mm H8 (87x) y H20 (35x); buscador 5x24; espejo diagonal a 90°; lente de Barlow 2x; inversor de imágen 1,5x; dos manuales de instrucciones.

¡nuevo! con trípode en aluminio

cod. 1739 KONUSTART-900 Ø60 mm F.900 f/15

EL TELESCOPIO ECUATORIAL PARA USO ASTRONOMICO Y TERRESTRE

CARACTERISTICAS TECNICAS: Optica entubada y colimada; montura ecuatorial; trípode en aluminio de dos secciones (de 69 a 116 cm). ACCESORIOS EN DOTACION: Dos oculares Ø24,5 mm H8 (112x) y H20 (45x); buscador 5x24; espejo diagonal a 90°; lente de Barlow 2x; inversor de imagen 1,5x; dos manuales de instrucciones.

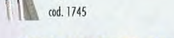


KONUSPACE- 500 Ø114 mm F.500 f/4,3

EL CLASICO Y LUMINOSO REFLECTOR NEWTONIANO

CARACTERISTICAS TECNICAS: Optica entubada y colimada; montura ecuatorial; trípode en aluminio de dos secciones (de 69 a 116 cm).
ACCESORIOS EN DOTACION: Dos oculares Ø31,8 mm F6 (83x) y H20 (25x); buscador 5x24; filtro lunar; dos manuales de instrucciones.

trípode en aluminio oculares ø31,8



cod. 1747 KONUSPACE- 70 Ø70 mm F.900 f/4,3

NUEVO, CON MONTURA SEMIPROFESIONAL

CARACTERISTICAS TECNICAS: Optica multitratada, entubata y colimada, montura ecuatorial motorizable con trípode en aluminio de dos secciones (de 77 hasta 130 cm).
ACCESSORIOS EN DOTACION: Dos oculares Ø31,8 mm H20 (45x) y F6 (150x); buscador 5x24; filtro lunar; prisma astronómico; dos manuales de instrucciones.



KONUSPACE- 114 Ø114 mm F.900 f/7,8

cod. 1749

COMPLETO REFLECTOR NEWTON

CARACTERISTICAS TECNICAS: Optica entubada y colimada; montura ecuatorial motorizable; trípode en aluminio de dos secciones (de 77 a 130 cm).
ACCESORIOS EN DOTACION: Dos oculares Ø31,8 mm K10 (90x) y K25 (36x); buscador 5x24; filtro lunar; dos manuales de instrucciones.



VISTA-80 Ø80 mm F.400 f/5

TELESCOPIO, CATALEJO Y OBJETIVO FOTOGRAFICO

CARACTERISTICAS TECNICAS: Optica entubada y colimada; con objetivo doble acromático. ACCESORIOS EN DOTACION: Dos oculares Ø31,8 mm K12,5 (32x) y K20 (20x); buscador 6x30; prisma/inversor de imagen; enganche para trípode; instrucciones.

con 2 oculares

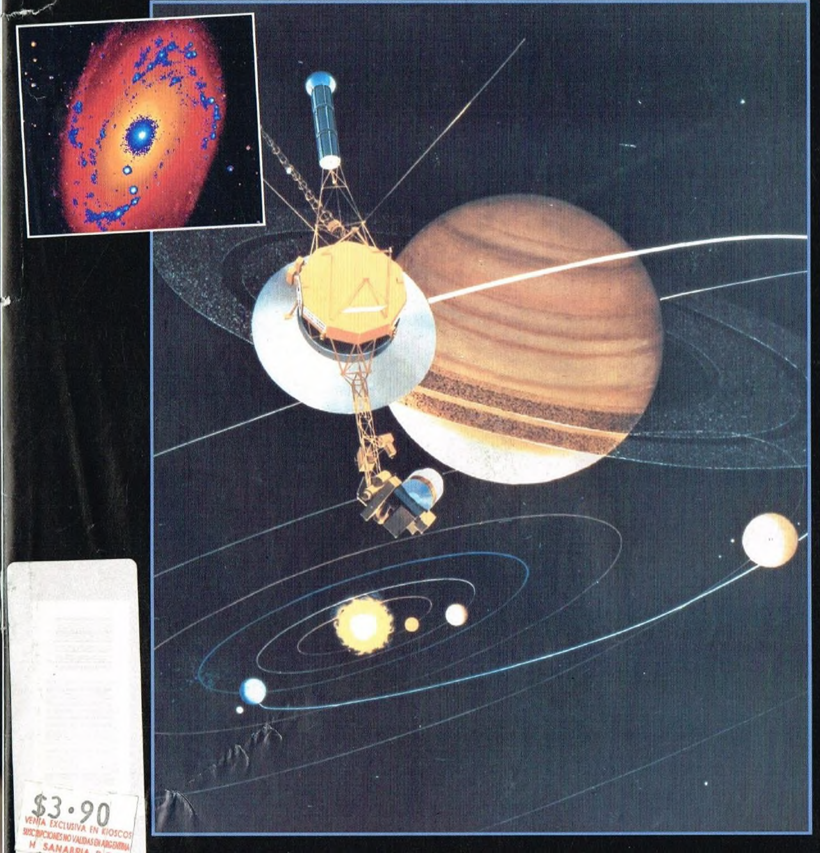


cod. 7111

EL UNIVERSO

ENCICLOPEDIA DE LA ASTRONOMÍA Y EL ESPACIO

30



PLANETA DeAGOSTINI



COMPOSICIÓN DE LA OBRA

Volumen 1	Fascículos 1	al	16
Volumen 2	Fascículos 17	al	32
Volumen 3	Fascículos 33	al	48
Volumen 4	Fascículos 49	al	64
Volumen 5	Fascículos 65	al	80

VENTA EN QUIOSCOS

Pida a su proveedor habitual que le reserve un ejemplar de EL UNIVERSO. Adquiriéndolo todas las semanas en el mismo punto de venta facilitará la distribución y obtendrá un mejor servicio.
Las tapas correspondientes a cada volumen se ponen a la venta con el fascículo que cierra el tomo. Con dicho fascículo se entregan las portadillas correspondientes.

Presidente: José Manuel Lara
Director General: Carlos Fernández
Director Editorial: Virgilio Ortega
Director General de Producción: Félix García
Coordinador General: Carles Dorico

© Editorial Planeta Argentina S.A.I.C.
Av. Independencia, 1668 - Capital Federal
Servicio de atención al cliente: Tel. (01) 482 - 0655 y 482 - 0657
Distribuye: Capital: Huesca-Sanabria,
Baigorri, 103, Capital Federal,
Interior: D.G.P., Alvarado, 2118, Capital Federal

© Editorial Planeta Mexicana, S.A. de C.V.
Av. Insurgentes Sur # 1162 - México D.F.
Servicio de atención al cliente: Tel. 575 13 48

© Editorial Planeta Colombiana, S.A.
Carrera, 68, n.º 25-55 - Santa Fé de Bogotá, D.C.
Servicio de atención al cliente: Tel. 9800 - 15315

© Editorial Planeta Chilena, S.A.I.C.
Olivares, 1229 - Santiago de Chile

ISBN Obra completa (con vídeo): 84-395-4148-1
Obra completa (sin vídeo): 84-395-4138-4
Fascículos (con vídeo): 84-395-4149-X
Fascículos (sin vídeo): 84-395-4139-2
Depósito legal: B-47.097-1997

Impresión: Cayfosa, Santa Perpètua de Mogoda, Barcelona
Impreso en España - Printed in Spain - Mayo 1998

Los editores se reservan el derecho de modificar el precio de venta de los componentes de la colección en el transcurso de la misma, si las circunstancias así lo exigieran.
Los editores garantizan la publicación de todos los fascículos que componen esta obra.

Fotografías: Lee Gibbons: cubierta, 116-117, 116ab., 117ar.; ESA/SPL: 107c.der.; E.T. Archive: 106ar.; Galaxy Picture Library: 101, 104, tercera de cubiertas; IGDA: 107ar.der.; Science Photo Library/Julian Baum: 106-107; Dr. Jeremy Burgess: 103 der.; Range: 111; Hugh Rowland: 110; Spectrum: 110, 111; US Naval Observatory: 112ar.izq.; Bristock-IFA: 114-115; BNSC/ESA: 118ab.; ESA: 118-119, 119ab., 120c.; Tony Stone Picture Library: 120ab.
Dibujos: Robin Carter/WLAA: 104-105, 117ab.; David A. Hardy: 102-103; Hugh Rowland: 105, 106ab., 120; Katz: 108-109; Sandra Russell/Black Hat: 112ar.; Julian Baum: 113; Farroxs: 116ar.; Robin Bottel: 115ab.; Spectrum Picture Library: 114ab.



LAS ÓRBITAS DE LOS CUERPOS CELESTES

Los movimientos de los objetos celestes han representado desde hace tiempo un problema para los astrónomos. Gracias a la ley de la gravitación universal, de Isaac Newton, fue posible dar una explicación de las órbitas de los astros.

El hombre ha observado el cielo , desde la Antigüedad, descubriendo ya en épocas prehistóricas que algunos de los objetos que veía en la bóveda celeste estaban dotados de un movimiento autónomo respecto a los demás. La necesidad de tener un calendario fiable condujo a una observación sistemática, con el consiguiente descubrimiento de que los movimientos de objetos como la Luna y los planetas se caracterizaban por una gran regularidad. De ahí deriva el concepto de órbita y, con él, una descripción del universo que lo rodea.

EL SISTEMA TOLEMAICO

El modelo de universo que disfrutó de mayor aceptación hasta la época de Galileo fue el tolemaico, en el que la Tierra figuraba en el centro de toda la creación y estaba rodeada por esferas cristalinas que arrastraban en su movimiento la Luna, el Sol, los planetas y las estrellas. Esta

Observando el cielo desde nuestro planeta, el hombre ha logrado comprender que se encuentra sobre un cuerpo celeste similar a los demás. Este descubrimiento se hizo gracias al estudio de las órbitas y a su interpretación.



Arriba, los mayores cuerpos del sistema solar orbitan alrededor del Sol a lo largo de recorridos de forma casi circular, situados cerca del mismo plano. Las principales diferencias entre las diversas órbitas planetarias radican en su radio y su periodo.

descripción del mundo permitía describir fácilmente los principales fenómenos que se observaban en el cielo, como el movimiento diario y anual de las estrellas, pero tenía dificultades para explicar las órbitas planetarias, que se pensaba que eran el resultado de la combinación de los diversos movimientos que se sumaban a los de la esfera en que estaba engarzado cada planeta. Por tanto, para poder explicar la complejidad de las órbitas de los planetas, el sistema tolemaico fue complicándose a su vez.

EL SISTEMA DE TYCHO BRAHE

Una descripción ligeramente diferente, que tuvo escaso éxito, se debe al gran astrónomo danés Tycho Brahe, que elaboró un modelo de universo en cuyo centro también estaba la Tierra, alrededor de la cual sólo orbitaban el Sol y la Luna, mientras que los planetas recorrían órbitas alrededor del Sol. Este conjunto, al orbitar alrededor de la Tierra, también arrastraba las estrellas alrededor de ella.

En su conjunto, el sistema de Tycho Brahe respetaba todo lo que podía observarse desde la Tierra, pero era complicado y, además, mantenía el geocentrismo tolemaico.

EL SISTEMA COPERNICANO Y LA LEY DE LA GRAVITACIÓN

Tycho Brahe no tuvo como único mérito la invención de su sistema: también fue uno de los más grandes astrónomos que vivieron en la época que precedió a la invención del telescopio, si no el más grande. Gracias a sus precisas observaciones, Kepler pudo formular sus famosas leyes que eliminaban el geocentrismo, situando el Sol en el centro del universo y relegando la Tierra al papel de un planeta más, dejando sólo la Luna orbitando alrededor de ella.

Las observaciones con telescopio efectuadas por Galileo aportaron otros argumentos en favor de este modelo, pero sólo gracias a la ley de la gravitación universal de Newton fue posible que esta visión del mundo tuviese una justificación teórica. Por tanto, se consolidó la hipótesis de Copérnico de un sistema solar similar al que conocemos hoy, con el Sol en su centro, los planetas orbitando a su alrededor y rodeado del cielo de estrellas fijas.

ÓRBITAS CERRADAS Y ÓRBITAS ABIERTAS

Las leyes de Kepler establecen que los planetas orbitan alrededor del Sol describiendo órbitas planas y elípticas, en las que nuestra estrella está situada en uno de sus focos. Estas órbitas son recorridas de manera que la velocidad del planeta es mayor cuanto más cerca está del Sol. Además, existe una relación muy precisa entre el período de revolución y la distancia entre el afelio y el perihelio del planeta, es decir, entre el punto más lejano y más cercano al Sol. Estas leyes pueden deducirse de la ley de la gravitación, que afirma que dos cuerpos se atraen con una fuerza proporcional a sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de su distancia: si la distancia se dobla, la fuerza disminuye cuatro veces; si se triplica, la fuerza disminuye nueve veces, y así sucesivamente.

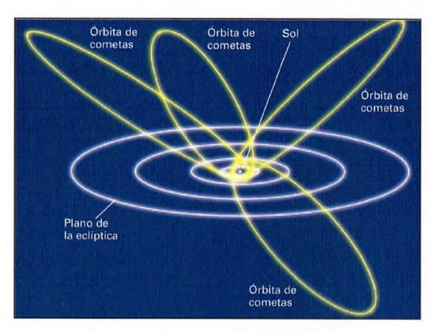
Naturalmente, en la época de Kepler y luego en la de Newton, las órbitas más estudiadas eran las de los planetas, porque se trataba de objetos bien conocidos, su comportamiento se conocía hacía siglos y se trataba de los únicos objetos orbitantes de los que se tenía noticia.

En realidad, la ley de la gravitación no sólo prevé órbitas elípticas, es decir, cerradas, en las que los planetas vuelven periódicamente sobre sus pasos. También existe otra posibilidad, consistente en que un objeto celeste que orbita alrededor de otro provenga de una distancia grandísima y que, después de pasar cerca del cuerpo que lo atrae, se aleje de él para siempre. En este caso, el cuerpo atraído recorre una órbita de forma hiperbólica, en la que el Sol también ocupa uno de los focos, a pesar de ser una órbita abierta. Los objetos típicos que recorren órbitas hiperbólicas son los cometas, al menos, algunos de ellos.

Uno de los éxitos de la gravitación universal fue precisamente el reconocimiento de que los cometas eran objetos del sistema solar, cuyas órbitas podían ser explicadas con la ley de la gravedad, mientras que, en el pasado, se suponía que se trataban de fenómenos atmosféricos. Sólo gracias a la obra de Newton se explicaron estas observaciones y, además, Edmond Halley descubrió que existía un cometa que reaparecía cada 76 años. Halley supuso que siempre se trataba del mismo objeto y predijo su siguiente aparición. Cuando ésta se realizó con puntualidad, la ley hallada por Newton recibió una confirmación que no admitía réplica y el cometa en cuestión recibió el nombre de Halley.



A la derecha, la explicación del movimiento orbital exacto de Mercurio fue uno de los mayores éxitos de la última teoría de la gravedad, la relatividad general de Einstein.



Las órbitas de los cometas están sujetas a notables variaciones debidas a diversas influencias. Las más importantes son las gravitacionales debidas a su paso cerca de los planetas. Estas acciones pueden modificar sus órbitas, hasta el punto de desviar algunos cometas fuera del sistema solar o aprisionarlos en órbitas muy pequeñas.



Arriba, la sonda Ulises que fue enviada al espacio para fotografiar los polos solares. Para efectuar esta misión, tuvo que salir del plano de la eclíptica. Esta maniobra habría sido imposible por la gran cantidad de combustible necesario, si no se hubiese recurrido a la acción gravitacional de Júpiter, que alteró la trayectoria de la sonda y la situó en una órbita elíptica. Esta órbita permitió la observación de regiones del Sol situadas a latitudes elevadas.

Al contrario de éste, muchos otros cometas provienen de las profundidades del espacio sideral y están destinados a marcharse sin volver a aparecer cerca del Sol y, por tanto, a no ser vistos de nuevo desde la Tierra. Estos cometas se mueven en órbitas hiperbólicas.

PARÁMETROS ORBITALES

¿En qué se diferencian dos órbitas? Naturalmente, una primera diferencia entre dos recorridos orbitales reside en la mayor o la menor distancia entre el cuerpo orbitante y el que lo atrae. Supongamos que tenemos un cañón tan potente, que puede colocar proyectiles en órbita, y supongamos también que, en cada disparo, las cargas utilizadas y los proyectiles son iguales. En estas condiciones, se podría afirmar que las órbitas que obtendremos no podrán ser diferentes, pero no es así. En efecto, podremos diversificar las órbitas variando el alza del cañón, cambiando la dirección a la que apuntamos o variando el lugar de la Tierra desde el que disparamos. Todo esto modifica las órbitas de dos maneras diferentes: en primer lugar, hay un cambio de orientación de las órbitas, que siempre tendrán la misma forma, pero estarán dispuestas de diferentes maneras en el espacio: por ejemplo, más o menos inclinadas respecto al ecuador; en segundo lugar, podríamos establecer una diferencia en la forma de las órbitas que, siendo siempre elípticas, podrían ser más o menos alargadas. Ejemplos típicos de objetos con órbitas muy diferentes son los satélites artificiales que circulan cada vez en mayor número alrededor de la Tierra.

Pueden encontrarse en órbitas más o menos altas sobre la superficie terrestre, pero incluso con la misma longitud del eje mayor (es decir, la distancia entre el punto más cercano y el más alejado de la Tierra), las órbitas pueden variar de excentricidad, es decir, por el mayor o menor achatamiento de las elipses que describen en el espacio.

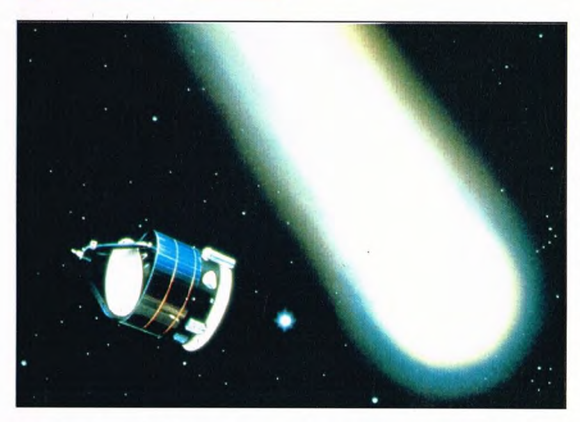
En el sistema solar existe una enorme cantidad de cuerpos sometidos principalmente a la influencia del Sol. La mayor parte de ellos se mueven en órbitas elípticas situadas en un plano, la eclíptica, excepto Plutón, cuya órbita está inclinada unos 20° respecto a este plano. En cambio, muchos otros cuerpos, los cometas, se caracterizan por tener unas órbitas situadas en planos muy inclinados respecto a la eclíptica. Un ejemplo típico es el cometa Swift-Tuttle, que da origen a la lluvia meteórica de las Perseidas, o Lágrimas de San Lorenzo, los meteoros que llueven en las noches de la primera mitad de agosto. Este cometa tiene un plano orbital casi perpendicular al de la órbita terrestre. Además, las elipses que trazan los cometas periódicos tienen una excentricidad bastante grande y varían mucho de un cometa a otro, mostrando alargamientos más o menos notables. Para hacer una comparación entre una órbita cometaria y una planetaria, puede decirse que el cometa Halley tiene un período de revolución comparable al de Urano, que orbita alrededor del Sol en 80 años. Así pues, por la tercera ley de Kepler, estos dos cuerpos tienen un eje mayor bastante similar. Sin embargo, como la excentricidad de sus órbitas es muy diferente, las dos órbitas descritas por el cometa Halley y Urano son diferentes: el planeta tiene una excentricidad próxima a cero, es decir, es casi circular (la excentricidad de una circunferencia es cero). En cambio, el cometa tiene una excentricidad casi igual a uno (si valiese uno, se movería en una parábola) y esto le lleva a recorrer una elipse tan alargada que, en ciertos períodos, pasa más cerca del Sol que la Tierra y, en otros, su afelio, el punto más alejado del Sol, está situado más allá de la órbita de Neptuno. Además, las dos elipses están situadas en planos bastante diferentes: mientras Urano se mueve casi sobre la eclíptica, el del cometa Halley está inclinado varios grados.

INFLUENCIAS RECÍPROCAS - EL DESCUBRIMIENTO DE NEPTUNO

La atracción mutua entre dos cuerpos por la fuerza de la gravedad depende, como ya se ha dicho, de sus masas y de la distancia entre ellos. No existe ninguna posibilidad de apantallar la fuerza de atracción que



A la derecha, el cometa Shoemaker-Levy que fue literalmente capturado por Júpiter a su paso por las proximidades de este planeta; la captura fue tan eficaz, que hizo caer al cometa sobre Júpiter.



Los cometas, al contrario de los planetas, que tienen una órbita casi circular y están situados cerca de la eclíptica, muestran características orbitales muy diferentes: elipses más o menos alargadas, hipérbolas, así como planos orbitales e inclinaciones muy variados respecto a la eclíptica.

existe entre dos cuerpos: como máximo, si la distancia que los separa es muy grande, esta fuerza será pequeñísima, pero nunca nula. Esto significa que todos los cuerpos que existen en el universo ejercen fuerzas gravitacionales mutuas, aunque los efectos más importantes se manifiestan entre objetos próximos. Pongamos un ejemplo: todos sabemos que la Luna está sometida a la atracción terrestre y, por tanto, se ve obligada a orbitar alrededor de nuestro planeta. Sin embargo, nuestro satélite natural también está sometido a la atracción de otros cuerpos, principalmente del Sol. Esto complica la forma de su órbita, que si sólo estuviese determinada por la presencia de la Tierra, sería una elipse perfecta.

La importancia de los estudios de las perturbaciones producidas por los planetas sobre los objetos del sistema solar ha sido fundamental para nuestro conocimiento del universo. Gracias al estudio del comportamiento de Saturno y Urano, se descubrió la existencia de Neptuno. Estos dos planetas presentaban irregularidades en sus órbitas que no podían explicarse del todo con la influencia de los objetos conocidos hasta entonces. El mérito fue de Le Verrier, que supuso que estas irregularidades se debían a la presencia de un octavo planeta hasta entonces no descubierto, lo cual permitió revelar la existencia de Neptuno. En base a unos cálculos muy complicados y a algunas hipótesis que luego resultaron acertadas (en efecto, es más fácil calcular una órbita partiendo de los objetos atractores, que prever cuáles podrán ser las características y la posición de un objeto perturbador partiendo de la trayectoria de un astro conocido), Le Verrier pronosticó con suficiente precisión la posición de Neptuno en el cielo. Sus previsiones fueron confirmadas por muchos observatorios astronómicos pocos días después de la comunicación de sus datos.

El descubrimiento de Neptuno significó uno de los resultados más importantes, sino el de mayor éxito, de la mecánica celeste.

EFECTO HONDA

Los cuerpos que más se resienten de las perturbaciones inducidas por los planetas del sistema solar son los cometas, cuyas órbitas son fuertemente alteradas al pasar cerca de los planetas, en particular, de Júpiter. El caso más espectacular es el del cometa Shoemaker-Levy, cuya órbita se alteró de tal forma a su paso cerca de Júpiter, que lo llevó a colisionar con el gigantesco planeta. Además, el paso por las proximidades de este objeto produjo la desintegración del cometa debido a las mareas gravitatorias: la diferencia de la fuerza de la gravedad entre la parte más próxima a Júpiter y la más alejada, a pesar de que el tamaño del núcleo cometario era de pocos kilómetros, hizo que se creasen unas tensiones tan grandes en el interior del cometa, que se fracturó en varios fragmentos.

La alteración de una órbita por el paso cercano a un objeto de gran masa se aprovecha cuando se proyectan los viajes de las sondas interplanetarias. Aprovechando el empuje que se obtiene al pasar cerca de un planeta, estas sondas pueden acelerarse hasta adquirir una velocidad suficientemente elevada para llegar a los confines del sistema solar (como ha sucedido con las sondas Pioneer y Voyager) o para llevarlas fuera del plano de la eclíptica (como se ha hecho con la sonda Ulises), unas operaciones que, de otra manera, habrían necesitado un gran gasto de carburante. Este efecto, llamado efecto honda, es del todo análogo al que llevó al cometa Shoemaker-Levy a colisionar con Júpiter, con la diferencia de que el desafortunado astro sufrió una disminución de velocidad en lugar de una aceleración. Naturalmente, algunas sondas pueden aprovechar el efecto honda para entrar en órbita alrededor de algunos cuerpos celestes utilizándolo como motor de frenado.

ÓRBITAS DE LOS SATÉLITES: MAREAS GRAVITATORIAS

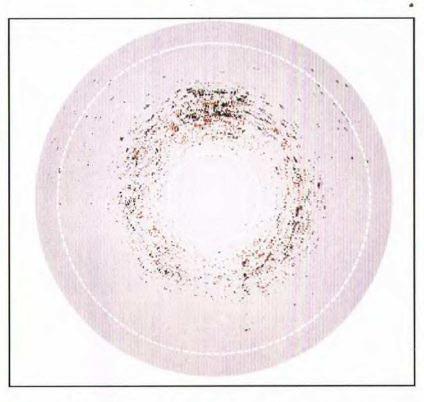
En la alteración de la forma de la órbita de los satélites de un planeta concurren otros factores, además de la acción del Sol y de los planetas, llamados efectos de marea. Estos fenómenos se deben a la diferencia entre la fuerza de atracción que el planeta ejerce sobre la parte del satélite más próxima a él y la más alejada. Estos efectos son los que han sincronizado el movimiento



A la derecha, el planeta Neptuno que fue descubierto basándose en el efecto perturbador que ejercía sobre las órbitas de Urano y Saturno.



Arriba, Júpiter es el mayor planeta del sistema solar y con su masa ejerce una gran influencia gravitacional que modifica las órbitas de los demás planetas.



Arriba, las órbitas de los asteroides experimentan una notable atracción gravitacional ejercida por Júpiter. Sólo pueden orbitar en algunas zonas del cinturón de asteroides, porque, en las otras, son expulsados por las perturbaciones producidas por el planeta gigante.

de rotación lunar con el orbital, haciendo que la Luna nos presente siempre la misma cara. Sin embargo, su acción no se limita a esto, porque también la Tierra está sincronizando lentamente su movimiento de rotación con el movimiento orbital lunar, alargando la duración del día. Este proceso es lentísimo y tiene una consecuencia adicional: la Luna tiende a alejarse de la Tierra. Existe una magnitud llamada momento angular que está ligada al estado de rotación de un sistema físico aislado, que se conserva. En una primera aproximación, éste es el caso del sistema Tierra-Luna. La definición del momento angular viene dada por el producto del momento de inercia por la velocidad de rotación. En nuestro caso, el momento angular viene dado por la suma de los momentos angulares terrestre y lunar debidos a los movimientos de rotación y de revolución alrededor del centro de masa. Si uno de ellos se reduce, como está sucediendo con los de rotación de la Tierra y de la Luna alrededor de los respectivos ejes, los otros deben aumentar, cosa que sucede efectivamente, porque está aumentando el movimiento angular asociado a los movimientos orbitales. Este incremento se manifiesta con un aumento de la distancia entre nosotros y la Luna. Sin embargo, una vez sumado todo esto, no podemos lamentarnos demasiado. Peor es lo que sucede en el sistema Neptuno-Tritón, en el que el satélite está animado de un movimiento retrógrado. En este caso, la conservación del momento angular prevé una progresiva reducción de la distancia planeta-satélite. En consecuencia, el destino de este último es caer sobre Neptuno.

LA ÓRBITA DE MERCURIO: LA CONFIRMACIÓN DE LA RELATIVIDAD GENERAL

Según las leyes de Kepler, todos los planetas recorren órbitas elípticas, con el Sol situado en uno de los focos. Sin embargo, como hemos visto, la forma de una órbita planetaria puede variar debido a la atracción ejercida por los otros planetas. Así, las elipses descritas por los planetas del sistema solar no son perfectas y, si bien son curvas cerradas, se modifican aunque sea de manera imperceptible. Existe un caso en el que la alteración de la órbita es suficientemente importante para poder ser detectada en la escala de tiempo de algunos años: la de Mercurio. El movimiento de Mercurio puede definirse con suficiente aproximación como una elipse que gira lentamente en el plano orbital. Este comportamiento ha representado durante decenios un enigma en el entorno de los astrónomos y de los especialistas en mecánica celeste. El cálculo de las perturbaciones debidas a los otros planetas sólo podía justificar en una mínima parte el comportamiento de la órbita del planeta más cercano al Sol. Sólo con la revisión de la teoría de la gravitación universal realizada por Einstein con su teoría de la relatividad general, se pudo explicar de manera satisfactoria el extraño comportamiento de este planeta. La relatividad general permitía explicar de manera muy precisa la órbita de Mercurio. Además, cuando elaboró su teoría, Einstein desconocía el problema de Mercurio y sólo posteriormente se pensó en calcular las órbitas planetarias utilizando la nueva teoría. De esta manera, se halló que la teoría preveía un movimiento de precesión de la elipse descrita por un planeta que estuviese suficientemente próximo al Sol.

IMPORTANTES CONCLUSIONES

Los resultados de la teoría y de las observaciones presentaron un buen acuerdo. Análogamente a lo que sucedió con el cometa Halley para la teoría newtoniana de la gravitación, la órbita de otro objeto del sistema solar decretó el éxito de la teoría einsteniana sobre la fuerza que gobierna el universo a gran escala.

Por tanto, en general, las órbitas de los cuerpos celestes pueden ser muy complicadas, aunque en una primera aproximación, muchos de ellos describen figuras geométricas sencillas como elipses e hipérbolas, aunque esta sencillez está enmascarada por la combinación de los movimientos del cuerpo celeste observado y de nuestro planeta. Éste es el motivo que ha impedido reconocer, desde la Antigüedad, que el verdadero cuerpo central del sistema solar era el Sol.

Del estudio de las irregularidades de los planetas se han derivado también grandes descubrimientos, como el del octavo planeta, Neptuno, o la confirmación de una teoría fundamental para la comprensión de todo el universo: la relatividad general.

LA DISTANCIA DE LAS GALAXIAS

Las galaxias son enormes aglomeraciones de estrellas similares a nuestra Vía Láctea que se encuentran esparcidas por todo el universo. Determinar con precisión las distancias a ellas implica entender cómo se ha formado el cosmos en el que vivimos.





Es imposible determinar con precisión cuántas galaxias hay en el universo. Los grandes telescopios muestran zonas del cielo completamente cubiertas de galaxias lejanas. Se calcula que al menos existen 100.000 millones, pero es evidente que no pueden contarse una por una.

El conocimiento de que los numerosos universos-isla que se ven como manchas de luz difusa en el cielo eran galaxias exteriores a la Vía Láctea, y por tanto situadas a enormes distancias de nosotros, es una conquista relativamente reciente, obtenida alrededor de los años veinte con el trabajo de Edwin Hubble y de otros pioneros de la cosmología. También ésta, entendida como la ciencia que estudia el universo en su conjunto, nació en aquellos mismos años, cuando se comprendió que el universo no se limitaba solamente a la Vía Láctea.

OBJETOS MUY LEJANOS

Para determinar las distancias a que se encuentran las galaxias no es posible utilizar métodos como el de la paralaje. Se trata de objetos demasiado lejanos y, en el caso más favorable, se habla de millones de años luz para llegar a los centenares de millones y a los miles de millones de años luz en el caso de las más lejanas. Por tanto, es necesario utilizar otros métodos, a menudo menos seguros, y también consideraciones teóricas no siempre del todo fiables.

La idea que está en la base de estas mediciones es la de la candela patrón. Se trata de identificar, en nuestra Galaxia, objetos de los que pueda determinarse la distancia y, una vez logrado, se puede calcular su luminosidad intrínseca. Luego se buscan los mismos objetos en la galaxia cuya distancia se desea determinar. La comparación entre la luminosidad aparente y la intrínseca (es decir, entre la magnitud relativa y la absoluta) permite calcular la distancia del objeto y, por tanto, de la galaxia que lo contiene.

LAS CANDELAS PATRÓN

Como candela patrón, o candela estándar, pueden utilizarse diversos tipos de objetos. A los que se recurre más a menudo son las cefeidas, las supernovas y las novas. Otros, menos seguros, son las estrellas de tipo W *Virginis*, las gigantes rojas, las supergigantes azules, las variables de tipo Mira, las binarias eclipsantes, etc.

Todos estos astros se emplean como indicadores primarios, y su distancia se calibra con observaciones en nuestra Galaxia o mediante consideraciones teóricas.

De las cefeidas, y de cómo pueden utilizarse para la determinación de las distancias por medio de la relación período-luminosidad, ya se ha hablado con detalle en otros capítulos. Sólo resta añadir que son muy útiles porque son bastante luminosas (y, por tanto, muy visibles, al menos en las galaxias relativamente próximas) y porque tienen una base teórica consolidada. Esto significa que la relación período-luminosidad no es una fórmula empírica determinada sólo experimentalmente, sino que tiene una justificación teórica muy precisa en la teoría de la pulsación estelar. Por tanto, las cefeidas desempeñan un papel fundamental en lo que se denomina a menudo escala cosmológica de distancia. La distancia máxima a la que es posible observar las cefeidas con los telescopios situados en la Tierra es de unos 15 millones de años luz. Dentro



A la izquierda, superposición de imágenes de la galaxia M81, de la constelación de la Osa Mayor. La parte roja se ha tomado en el visible y la azul en rayos X.

A la izquierda, imagen de gran campo de la Vía Láctea, nuestra Galaxia. Su forma aplanada aparece en el cielo como una franja de luz difusa, producida por la luminosidad de millones de estrellas lejanas.

En este radio hay varios grupos de galaxias (además aparte del Grupo Local). Por ejemplo, las situadas en las galaxias del Escultor, M81, IC 342 y NGC 5128. Con el telescopio espacial Hubble es posible observar cefeidas hasta algo más de 60 millones de años luz, por lo que consigue llegar al cúmulo de Virgo, del cual el Grupo Local es un miembro periférico.

LAS SUPERNOVAS Y LAS NOVAS

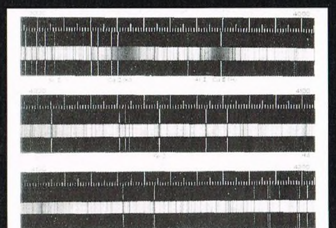
Las supernovas son estrellas que se encuentran en la etapa final de su existencia porque han agotado el combustible nuclear de su centro. Se hacen inestables, resplandecen de una manera muy espectacular y rápida, y alcanzan, en el máximo de su luminosidad, el brillo de toda una galaxia o incluso más. Por esto tienen un gran potencial como indicadores primarios, puesto que son visibles a distancias enormes. A título orientativo, puede decirse que las supernovas pueden utilizarse como candelas estándar hasta más allá de los 3.000 millones de años luz.

Los cálculos sugieren que, en nuestra Galaxia, debería estallar una supernova cada 50 años, pero, en realidad, la última que fue observada es la de Kepler en 1604 (una verdadera lástima, porque ocurrió pocos años antes de la invención del telescopio). Cada año se observan varias decenas de supernovas en galaxias exteriores, con lo que se puede evaluar su distancia, aunque hay que estar atentos a distinguir las supernovas del tipo I de las del tipo II, que tienen luminosidades intrínsecas diferentes.

En cambio, las novas son estrellas que se encuentran siempre en sistemas dobles y aumentan de improviso su luminosidad a causa de intercambios de materia entre las dos componentes. Como tienen propiedades variables, es difícil utilizarlas como indicadores de distancia, aunque en los últimos años se han dado grandes pasos adelante en la comprensión teórica de los fenómenos que presentan. Potencialmente pueden aprovecharse hasta el cúmulo de Virgo (40-60 millones de años luz), pero sólo se han utilizado para comprobar las distancias a las Nubes de Magallanes y a la galaxia de Andrómeda.

Abajo, fotografía de aficionado de la galaxia M83, en la constelación de la Hidra. Se trata de una galaxia mitad espiral normal y mitad barrada.





Arriba, el espectro del Sol. Las rayas que aparecen en los espectros de los objetos celestes, además de permitir medir las distancias, identifican los elementos químicos de los que están compuestos.

LOS INDICADORES SECUNDARIOS

Una vez determinadas las distancias de algunas galaxias próximas mediante los indicadores primarios, estos últimos se pueden utilizar para calibrar los indicadores secundarios (menos seguros), que se emplean para medir las distancias de las galaxias lejanas. El principio siempre es el mismo, sólo que se adoptan objetos celestes diferentes como candelas estándar.

Entre los indicadores secundarios hay, por ejemplo, las regiones H II, los cúmulos globulares y las estrellas gigantes rojas y azules de los cúmulos.

LAS SUPERNOVAS DE TIPO II MÁS IMPORTANTES OBSERVADAS EN GALAXIAS EXTERIORES

Nombre SN	Galaxia (NGC)	M
1923a	5236	12,4
1926a	4303	12,5
1936a	4273	15,0
1937a	4157	15,55
1937f	3184	13,75
1940a	5907	14,7
1941a	4559	13,4
1948b	6946	14,4
1957a	2841	14,4
1959d	7331	13,8
1961u	3938	14,3
1965l	3631	14,65
1966b	4688	14,9
1966e	4189	14,7
1968l	5236	11,75
1969l	1058	13,15
1970g	5457 (M101)	11,75
1972q	4254	15,6
1973r	3627	15,0
1975t	3756	15,6
1979c	4321 (M100)	12,0
1980k	6946	11,6

M indica la magnitud bolométrica (obtenida sumando la emisión en todas las longitudes de onda) en el máximo de su luminosidad.

H
Diámetros de las galaxias
Magnitudes de las galaxias
Indicadores secundarios
Estrellas de alta luminosidad
Grandes regiones H II
Cúmulos globulares
Indicadores primarios
Novas
RR Lyrae
Cefeidas
Paralaje de expansión
Paralajes estáticas
Diagrama H-R



Arriba, zona de la Vía Láctea en la región de la constelación del Cisne, en la que se pueden ver otras nebulosas gaseosas.

Es evidente que para llegar cada vez más lejos es necesario tener en cuenta objetos cada vez más luminosos, hasta el punto de que se utilizan grandes nubes de gas ionizado (las regiones H II) o cúmulos estelares (se emplean los globulares y no los abiertos, porque los primeros son más similares entre sí que los segundos, y son más luminosos). Sirviéndose de los cúmulos globulares es posible medir distancias de hasta unos 50 millones de años luz.

En lo que respecta a las regiones H II, dos famosos astrónomos, Sandage y Tammann, han demostrado que es posible crear una relación matemática que vincula la luminosidad media de las tres regiones H II más brillantes con la luminosidad intrínseca de la propia galaxia, aunque esta relación todavía no es muy segura.

LAS RAYAS DEL ESPECTRO

En la búsqueda de nuevos métodos cada vez más fiables para poder determinar las distancias de las galaxias lejanas del universo, los astrónomos descubrieron que también es posible emplear para este fin sus espectros, que se obtienen haciendo pasar su luz a través de un prisma y estudiando las rayas que aparecen.

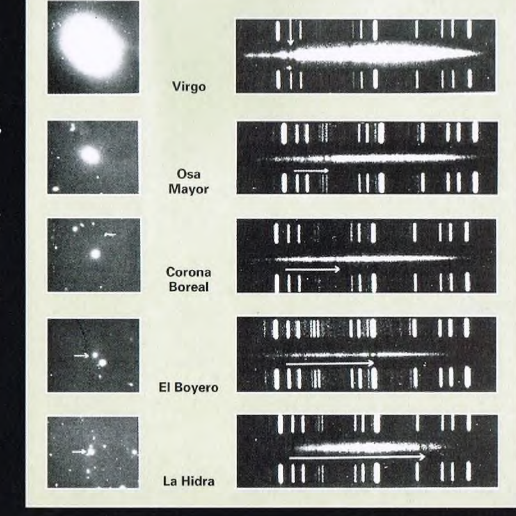
En 1977, los astrónomos Brent Tully y Richard Fisher observaron que existía una relación entre la anchura de la línea de emisión del espectro que se encuentra en la longitud de onda de 21 cm, característica del hidrógeno en estado neutro, y la magnitud absoluta de la galaxia que la emite. Esta raya es fácilmente visible en los espectros de las galaxias espirales, si se utilizan los radiotelescopios. Por tanto, con estas observaciones se puede averiguar la distancia de una galaxia mediante su luminosidad intrínseca. Posteriormente, otros astrónomos consiguieron poner a punto un método análogo aplicable a las galaxias elípticas.

Otra técnica se deriva del hecho de haber observado que la velocidad con que orbitan las estrellas alrededor del centro de la galaxia a la que pertenecen depende de la magnitud absoluta y de la masa de la propia galaxia. Las galaxias que giran rápidamente son muy luminosas, mientras que las lentas son intrínsecamente débiles. Como la velocidad de una estrella puede determinarse a menudo con estudios espectroscópicos, es posible conocer su magnitud y, por tanto, la distancia a la galaxia.

LAS CLASES DE LUMINOSIDAD DE LAS GALAXIAS

Cuando se observa el cielo a distancias muy grandes, los diversos métodos resultan de más difícil

Abajo, espectros de galaxias dispuestas a distancias crecientes de nosotros. Las rayas de los espectros están desplazadas cada vez más hacia el rojo.





Arriba, imagen del objeto 30 Doradus, *en la Gran Nube de Magallanes, tomada con el telescopio espacial Hubble. Se trata de una gran región H II que rodea un gran cúmulo abierto.*

aplicación y las mediciones presentan incertidumbres muy grandes. Como candelas patrón es necesario utilizar a menudo galaxias enteras que, a este fin, se han clasificado oportunamente. Dividiéndolas en clases de luminosidad y, suponiendo que se conocen sus magnitudes absolutas, es posible medir distancias de hasta unos 500 años luz.

Otro método consiste en evaluar el tamaño de las galaxias. Suponiendo que se establezca que todas las galaxias espirales de un cierto tipo tienen las mismas dimensiones, midiendo cómo aparecen en el telescopio es posible averiguar su distancia. El último paso es aprovechar cúmulos enteros de galaxias como candelas patrón o, por lo menos, las galaxias más brillantes de un cúmulo.

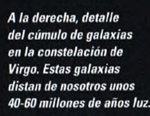
Como puede comprobarse, muchos métodos se «superponen», es decir, son aplicables dentro del mismo intervalo de distancias. Esto no es una redundancia inútil, sino muy importante, porque permite calibrar mejor cada uno de los métodos y reducir los errores de las medidas.

EN LOS CONFINES DEL UNIVERSO

Explorando con el telescopio a distancias de varios miles de millones de años luz, se llega casi a los límites del universo observable. Las galaxias que están tan alejadas se ven en un estado evolutivo diferente de las cercanas, porque aparecen más jóvenes. En efecto, como ya se ha dicho, la luz viaja a una velocidad finita aunque muy grande, y emplea un cierto tiempo para recorrer las enormes distancias que nos separan de las galaxias lejanas. Esto significa que vemos estos objetos en el estado en que se encontraban cuando la luz partió de ellos hace varios miles de millones de años.

Esta consideración introduce mayores incertidumbres en la escala de las distancias, porque es muy arriesgado afirmar que las galaxias que pueblan el universo «joven» son iguales a las que se encuentran cerca de nosotros. En efecto, todavía no es posible crear un mapa que abarque todo el





A la derecha, detalle del cúmulo de galaxias en la constelación de Virgo. Estas galaxias distan de nosotros unos 40-60 millones de años luz.

PROTAGONISTAS DEL UNIVERSO

Las galaxias son los constituyentes fundamentales del universo, cuya estructura a gran escala es muy fácil de describir. El universo está formado por enormes espacios vacíos punteados por centenares de miles de millones de estrellas reunidas en galaxias. Si se lograse determinar con precisión las distancias a las que se encuentran estos objetos, se obtendría información de cómo se ha hecho el universo, su tamaño y la edad que tiene.

Arriba, fotografía de aficionado de la galaxia M33 en la constelación del Triángulo. Junto con la Vía Láctea y M31, es uno de los miembros más notables del Grupo Local.

universo: hay que contentarse con la región que se encuentra dentro de un radio de un centenar de millones de años luz de la Tierra. No es poco, pero también hay que tener en cuenta que el radio estimado del universo es del orden de 10.000 a 15.000 millones de años luz.

LA LEY DE HUBBLE

El último método de medida de las distancias de las galaxias al que queremos referirnos es el que emplea la ley de Hubble. Esta ley establece una relación entre la velocidad con que se aleja de nosotros una galaxia y su distancia. Por tanto, midiendo el primer parámetro, es posible calcular el segundo. Esta ley depende de una constante, llamada constante de Hubble e indicada con el símbolo H_0, cuyo valor todavía es objeto de controversias. La esperanza de



Arriba, fotografía de la Gran Nube de Magallanes, pequeña galaxia irregular satélite de nuestra Vía Láctea.

poder calibrar esta relación con las galaxias del cúmulo de Virgo, que sólo están a 40-60 millones de años luz y cuya distancia se puede medir independientemente con otros métodos, es probable que haya resultado fallida. Determinar con precisión el valor de la constante de Hubble significa también poder medir con exactitud el tamaño y la edad del universo en que vivimos.

MAGNITUDES ABSOLUTAS DE LOS CÚMULOS GLOBULARES DE ALGUNAS GALAXIAS DEL GRUPO LOCAL

Galaxia	M
M31	−21,1
Vía Láctea	−20
GNM	−18,5
PNM	−16,8
M33	−18,9
Fornax	−13,6
NGC 147	−14,9
NGC 185	−15,2
NGC 205	−16,4
NGC 6822	−15,7
IC 1613	−14,8
WLM	−16,0

Como puede observarse, la magnitud media no es siempre similar y esto crea notables problemas al considerar como candelas estándar los cúmulos globulares.

EL HORNO

Otra de las constelaciones inventada por el incansable abate Lacaille para llenar el hemisferio celeste austral.



La constelación del Horno, u Hornillo Químico, fue introducida a mitad del siglo XVIII por el abate Lacaille, conocido por las numerosas e insignificantes nebulosas que quiso denominar.

CÓMO LOCALIZAR LA CONSTELACIÓN

Las pálidas estrellas del Horno pueden encontrarse partiendo del alineamiento entre Alfa y Beta *Orionis*, es decir, entre Betelgeuse y Rigel. Siguiendo esta línea en dirección suroeste y desplazándose ligeramente hacia el norte, a unos 40° de Rigel se encuentra la constelación del Horno.

ESTRELLAS NOTABLES

El astro más luminoso de esta constelación es Alfa (magnitud 3,9), una estrella amarilla de magnitud 4 con una compañera (magnitud 7) situada a 4" de distancia. El tiempo empleado por la estrella menor para orbitar alrededor de la principal supera los 300 años. Como se descubrió en 1835, desde entonces sólo ha recorrido algo más de la mitad de su órbita.

También Omega es doble y está formada por un par de estrellas de magnitud 5 y 7,7, distantes entre sí algo más de 10 segundos.

Las demás estrellas de la constelación son de quinta magnitud o superior.

OTROS OBJETOS DEL HORNO

La constelación del Horno, tan pobre en estrellas, muestra en cambio una gran cantidad de galaxias y, dentro de sus límites, hay un cúmulo que dista un centenar de millones de años luz de nosotros.

Además, las fotografías de exposición muy larga, obtenidas con telescopios de gran potencia, muestran una débil galaxia enana que forma parte del Grupo Local. Esta galaxia dista de nosotros aproximadamente 630.000 años luz y está compuesta por unos pocos millones de estrellas dispersas en una zona de cielo relativamente amplia, hasta el punto de constituir un grupo demasiado poco compacto para ser visto con un telescopio de aficionado. Con un telescopio de 20 cm de diámetro, aunque no se puede distinguir este objeto, se puede detectar en cambio NGC 1049, un cúmulo globular de magnitud 13, que orbita alrededor de la galaxia enana. Este cúmulo puede observarse mejor gracias a su mayor compacidad, porque aunque tiene un menor número de astros, están agrupados en una zona más pequeña. El sistema del Horno, como suele llamarse esta evasiva galaxia, es similar a un objeto que hay en la vecina constelación del Escultor, llamado sistema del Escultor. El Grupo Local comprende otras galaxias de pequeñas dimensiones y de muy difícil observación. Esto se debe a que estos sistemas menores no pueden definirse en otros cúmulos de galaxias debido a su baja luminosidad superficial.

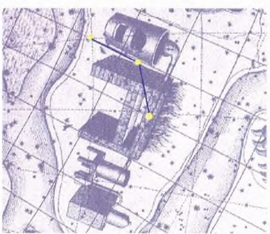
La galaxia más luminosa del cúmulo del Horno es NGC 1316, de magnitud 10. Su tamaño es del orden de 3,5' × 2,5'. Este objeto también emite una gran cantidad de ondas radio, por lo que se la conoce como la radiofuente *Fornax* A.

Otras galaxias relativamente brillantes son NGC 1365 y NGC 1399, de magnitudes 10 y 11 respectivamente. La primera es una galaxia de forma espiral barrada, mientras que la segunda tiene forma elíptica.

Sin embargo, en la constelación del Horno no sólo existen objetos extragalácticos: también se puede observar una nebulosa planetaria, NGC 1360, que presenta en su centro una estrella de novena magnitud. La nebulosa se extiende aproximadamente en un diámetro de 5 minutos.



Arriba, la galaxia enana NGC 1365, en la constelación del Horno, forma parte del Grupo Local, del que es miembro junto con la Vía Láctea. A pesar de estar a unos 600.000 años luz de nuestra Galaxia, menos de un tercio de la distancia a M31, la galaxia de Andrómeda, visible a simple vista, NGC 1365 es invisible en los telescopios de aficionado por su bajísima luminosidad superficial.



Arriba, la constelación del Horno representa el hornillo de un químico.



LOS MITOS Y LAS ESTRELLAS

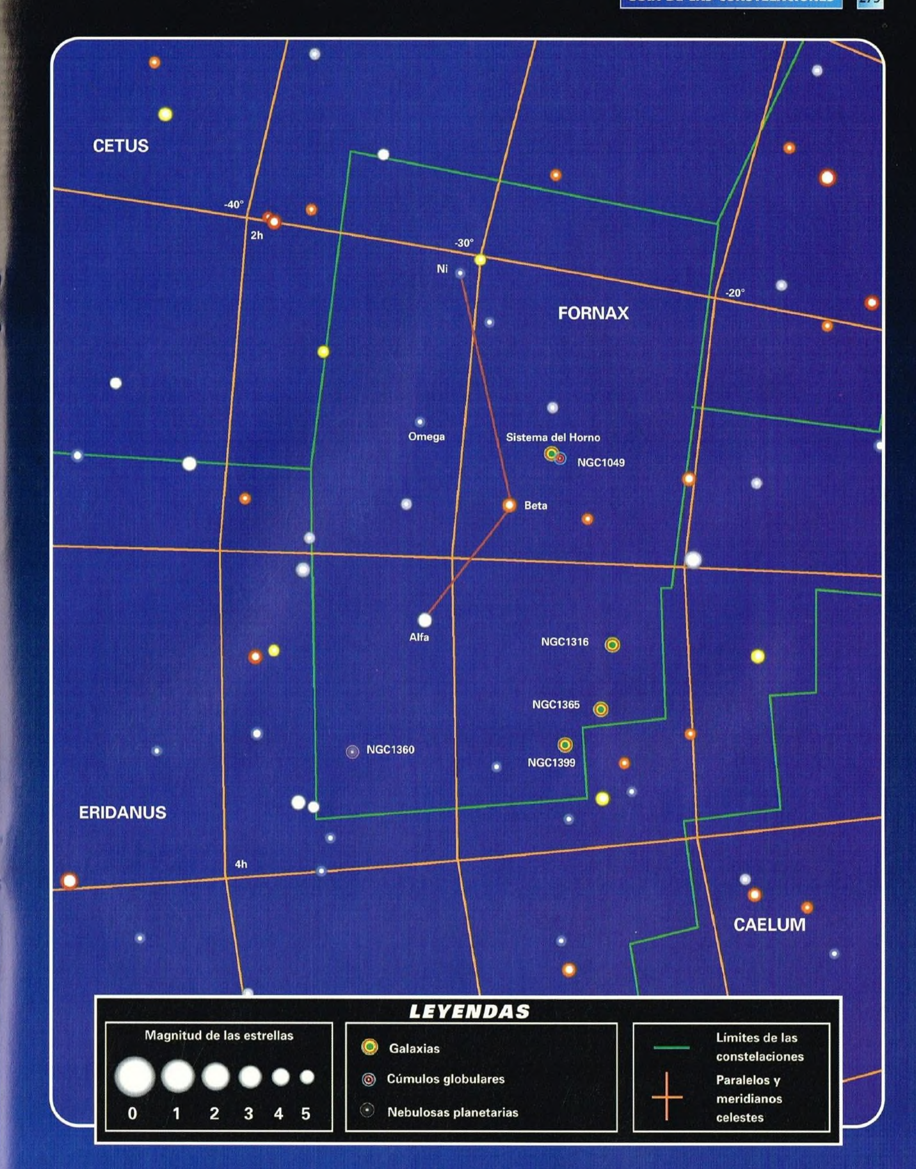
EL HORNO

La constelación del Horno representa el homenaje que el abate Lacaille quiso tributar a la ciencia química. Representa el hornillo químico y su nombre originario era *Fornax chemica*, que luego se abrevió simplemente a *Fornax*.

DÓNDE BUSCARLA

EL HORNO

La pequeña constelación del Horno se extiende entre 1 hora 40 minutos y 3 horas 50 minutos de ascensión recta, y entre 20° y 40° S de declinación, aproximadamente. La rodean las constelaciones de la Ballena *(Cetus)*, del Fénix *(Phoenix)* y Eridano *(Eridanus)*, dando a la región forma de rectángulo casi perfecto. Ninguna de sus estrellas supera la magnitud 5, y sus tres astros más luminosos adoptan la configuración de una V.


CETUS
-40°
2h
-30°
Ni
-20°
FORNAX
Omega
Sistema del Horno
NGC1049
Beta
Alfa
NGC1316
NGC1365
NGC1360
NGC1399
ERIDANUS
4h
CAELUM
LEYENDAS
Magnitud de las estrellas
0 1 2 3 4 5
Galaxias
Cúmulos globulares
Nebulosas planetarias
Límites de las constelaciones
Paralelos y meridianos celestes

LA LEY DE HUBBLE

La observación del universo que se expande se expresa con una sencilla ley matemática de un solo parámetro: la constante de Hubble, H_0. Pero sólo tiene un defecto: H_0 no se conoce.



La ley de Hubble expresa una relación empírica entre la velocidad de alejamiento de los objetos extragalácticos (galaxias lejanas, cuásares, núcleos galácticos activos y cualquier objeto lejano) y su distancia.

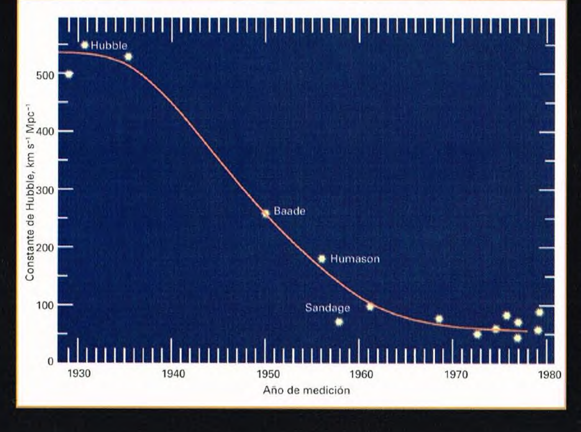
La ley, a pesar de su sencillez, es una consecuencia de la ley de la relatividad general combinada con los modelos de universo de Friedman, que prevén un acontecimiento inicial en el que todo el universo estaba comprimido en un punto de tamaño extremadamente reducido: el Big Bang. El hecho de que Edwin Hubble comprobase una ley de este tipo en 1929 se ha considerado una de las pruebas de la validez del modelo dinámico del Big Bang.

La ley se representa: $v = H_0 d$
donde *v* es la velocidad de alejamiento de la galaxia, que puede medirse con un análisis espectrográfico, y *d* es la distancia. Esta última se determina con métodos fotométricos que relacionan la magnitud observada de un objeto con su magnitud absoluta, conocida a través de una ley (normalmente empírica) que implica mediciones de varios tipos (período de variabilidad para las cefeidas, anchura de la raya emitida por el hidrógeno neutro a 21 cm para la relación Tully-Fisher, etc.). Por tanto, la constante H_0 tiene dimensiones de velocidad dividida por una distancia, es decir, dimensiones del inverso de tiempo (segundos a la potencia −1). Por otro lado, los astrónomos acostumbran a emplear los km/s para la velocidad y los megaparsecs (1 megaparsec = 1 Mpc = 1.000.000 pc = 3.260.000 años luz) para las distancias, con la consecuencia de que la constante de Hubble se expresa en las insólitas unidades de km/(s Mpc).

La interpretación directa es sencilla: todas las galaxias se están alejando de la nuestra a una velocidad que es proporcional a su distancia. Cuanto más alejada está una galaxia, mayor es su velocidad de recesión. Esto sucede si todo el espacio se expande uniformemente, con el mismo ritmo en todas direcciones.



Arriba, Edwin Hubble trabajando en el telescopio Schmidt de Monte Palomar.

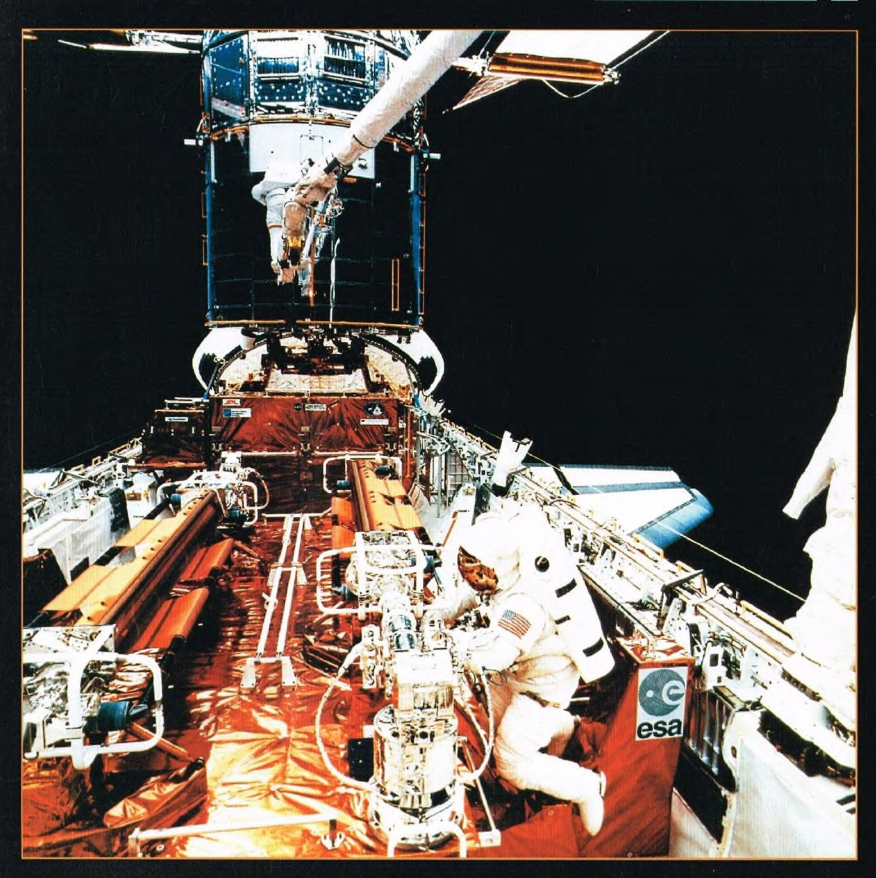


*Estimación de la constante de Hubble desde los años treinta a los ochenta. El gráfico muestra una variación notable: el valor de H_0 hoy es entre 5 y 10 veces menor que la primera evaluación de Hubble (*The Cosmological Distance Ladder *de Rowan-Robinson, 1985).*

Actualmente, el valor de H_0 es uno de los temas más debatidos en astronomía. El nombre con que se bautizó el telescopio espacial (Hubble) es el signo de uno de los principales objetivos declarados de la misión espacial. En efecto, conocer H_0 significa poder establecer las dimensiones del universo conocido y determinar también el tiempo transcurrido desde el Big Bang.

LA VELOCIDAD DE EXPANSIÓN DEL UNIVERSO

En 1924, midiendo la distancia de Andrómeda y de la espiral del Triángulo, Edwin Hubble estableció que las nebulosas espirales eran galaxias como la nuestra situadas a distancias enormes. En sus estudios siguientes se dio cuenta de que la velocidad de las galaxias no era casual



Arriba, dos astronautas estadounidenses durante las fases de reparación del telescopio espacial dedicado a Edwin Hubble.

y que la mayoría de estos objetos se alejaban de nosotros. En su artículo de 1929 presentaba finalmente el descubrimiento de que la velocidad de alejamiento de las galaxias era directamente proporcional a su distancia. También obtuvo la primera medida de la constante de proporcionalidad: con la docena de galaxias de su lista, H_0 tenía un valor de 540 km/(s Mpc), un valor extremadamente grande, de unas 5 a 10 veces superior al que hoy se considera como el más probable.

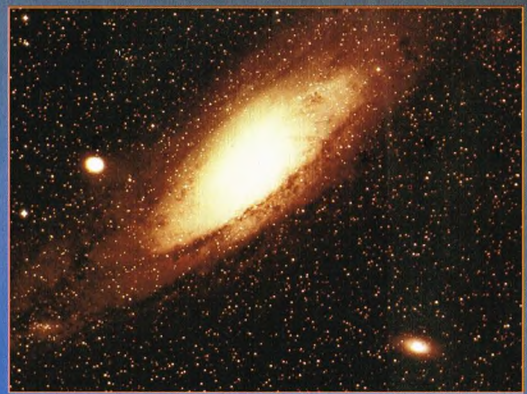
Hubble no indicaba ninguna explicación para este valor tan grande, a pesar de tratarse de un tema de máxima importancia. El valor de la constante de Hubble es una medida directa de la expansión de nuestro universo. Todo observador situado en un universo en expansión verá, precisamente como nosotros, todas las demás galaxias alejándose siguiendo la ley de Hubble, con el mismo valor de H_0. De todo esto se puede deducir que si retrocedemos en el tiempo, en un determinado momento del pasado todas las galaxias debían estar muy próximas entre sí y, al límite, reunidas en un mismo punto. Cuanto más elevado es el valor de H_0, más rápida es la expansión del universo y, en consecuencia, más cercano a hoy fue el momento del inicio: el Big Bang.

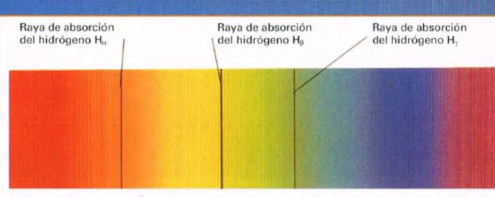
El valor de 540 km/(s Mpc) para H_0 es tan elevado, que limita la edad del universo a 2.000 millones de años, mientras que la edad de algunas rocas terrestres ya se había estimado en un mínimo de 4.000 millones de años. La contradicción quedó en

EL CÁLCULO DEL *REDSHIFT*

El cálculo de la velocidad con que las galaxias se alejan de nosotros se efectúa mediante medidas espectroscópicas. Es decir, se analiza el espectro de la luz que emite la galaxia y se reconocen algunas características (las rayas de emisión o de absorción) que se deben a la presencia de elementos químicos bien conocidos y que, por tanto, tienen una longitud de onda λ conocida en los laboratorios terrestres. Sin embargo, cuando un objeto que emite luz a una determinada longitud de onda λ_0 y se mueve con una velocidad *v* respecto al observador, hay que tener en cuenta el efecto doppler. En este caso, la longitud de onda λ observada es mayor (más desplazada hacia el color rojo) si la fuente se aleja y menor (desplazada hacia el azul) si se acerca. La relación matemática se escribe como: $\lambda/\lambda_0 = 1 + v/c$

donde *c* es la velocidad de la luz, aproximadamente igual a 300.000 km/s. La cantidad v/c se llama *redshift*, desplazamiento hacia el rojo, y se indica con la letra *z*.





La galaxia de Andrómeda. Abajo, rayas del hidrógeno utilizadas para medir el redshift.

suspenso durante los 10 años siguientes, mientras Hubble continuó trabajando en el observatorio de Monte Wilson observando variables cefeidas en las galaxias externas. La segunda guerra mundial frenó sus trabajos e incluso los interrumpió, al igual que a otros millones de personas. Sólo después de la guerra, las observaciones de Baade revelaron la presencia de dos poblaciones estelares distintas y, por tanto, de dos familias de variables cefeidas. La constante de Hubble quedó inmediatamente dividida por dos, el tamaño del universo se duplicó y el momento del Big Bang retrocedió en el tiempo hasta 4.000-5.000 millones de años.

Las mediciones modernas de H_0 se han realizado según dos escuelas



Arriba, fotografía de la galaxia NGC 4639 obtenida con el telescopio espacial: su distancia se midió con el método de las cefeidas.

de pensamiento distintas, donde el grupo tejano, representado por el astrónomo Gérard de Vaucouleurs prefiere un valor alto igual a 100 km/(s Mpc), mientras que el grupo californiano, dirigido por Allan Sandage, tiende a un valor bajo de 50 km/(s Mpc).

EL PROBLEMA CENTRAL

La controversia se centra en la medida de la distancia del cúmulo de galaxias de Virgo, un grupo de miles de galaxias en el centro del supercúmulo Local, en el que nuestro Grupo Local de galaxias ocupa un lugar periférico.

La distancia de las galaxias de Virgo se ha estimado de varias maneras y, en algunos casos, de la misma manera, pero calibrada de forma diferente. Ésta es la causa de la discrepancia sobre los valores obtenidos, aunque en esta disputa científica se han incluido a menudo aspectos psicológicos y sociológicos. El grupo tejano, con su escala corta de distancias, sitúa el cúmulo de Virgo a una distancia del orden de 12 -14 Mpc, con una H_0 de 80-100 km/(s Mpc), en base a métodos como la luminosidad de los cúmulos globulares y de las nebulosas planetarias utilizados como candelas estándar, el método de Tonry de las fluctuaciones estadísticas del brillo superficial y, principalmente, las relaciones de Tully-Fisher que relacionan la magnitud absoluta de una espiral con la anchura de la raya emitida por el hidrógeno neutro a 21 cm. El principal efecto de un valor alto de H_0 es tener un universo más joven, de una edad que las teorías de la evolución estelar asignan a las estrellas de los cúmulos globulares más viejos. Este hecho ha situado a la comunidad de los astrónomos teóricos en contra de la escuela tejana.



Arriba, la galaxia esférica enana Leo I, una de las más cercanas a la Vía Láctea.

EL TIEMPO DE HUBBLE

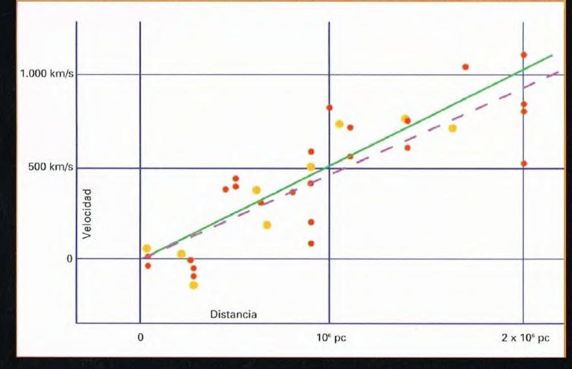
Las dimensiones de la constante H_0 son las del inverso del tiempo (s^{-1}). Por tanto, la cantidad $1/H_0$ tiene las dimensiones de un tiempo y se llama tiempo de Hubble. Representa el tiempo necesario para obtener las galaxias separadas tal como las observamos hoy, si la velocidad de expansión del universo hubiese permanecido siempre constante. Dado que las dimensiones del universo han cambiado, con una velocidad mayor al principio que en la actualidad, $1/H_0$ es mayor que la edad del universo. La ley exacta depende de Ω, que representa la cantidad total de materia que hay en el universo. Si Ω es mayor que 1, la materia existe en cantidad suficiente para detener la expansión y volver a cerrar el universo sobre sí mismo. En cambio, si Ω es menor que 1, la materia es demasiado escasa y la expansión continuará indefinidamente. El valor límite $\Omega = 1$ corresponde a lo que se ha llamado universo crítico o de Einstein-De Sitter. En este caso, el universo también se expandirá para siempre, aunque más lentamente. La edad actual del universo equivale a 2/3 H_0, es decir, 19.000 millones de años si H_0 vale aproximadamente 50 km/(s Mpc), o bien la mitad si H_0 es del orden de 100 km/(s Mpc).

El valor bajo de H_0 medido por los astrónomos allegados a Sandage y Tammann es de unos 40-50 km/(s Mpc). Esto no plantea ningún problema para los cúmulos globulares y, por tanto, es aceptado con más facilidad por la mayoría de miembros de la comunidad astronómica internacional. La relación de Faber-Jackson para la dispersión de velocidad en el interior de las galaxias elípticas y una recalibración de la relación Tully-Fisher soportan estos resultados.

La última palabra dependerá de los resultados que proporcione el telescopio espacial sobre las variables cefeidas del cúmulo de Virgo. Ya se tienen los primeros resultados. La primera galaxia estudiada fue NGC 4321 (Freedman y colaboradores en 1994), que proporcionó un valor de H_0 de unos 80 km/(s Mpc). La comunidad defensora de las mediciones tejanas cantó victoria con la medida de 25 Mpc de distancia de la galaxia NGC 4369 obtenida por Sandage en 1996, que significa una H_0 = 47 km/(s Mpc). Una vez más, parece que cada grupo de astrónomos ha obtenido el valor que ya preveía. Los datos más recientes proporcionan una nueva calibración de la relación Tully-Fisher para espirales observadas por el Space Telescope, que favorece una vez más valores de la constante de Hubble del orden de 55 km/(s Mpc). La verdadera respuesta vendrá con una serie de mediciones sobre un grupo de galaxias del cúmulo de Virgo, y no basada en sólo dos espirales, como hoy. El problema consiste en encontrar el verdadero centro del cúmulo.

A la derecha, ampliación de una región de la galaxia NGC 1365, una espiral enana barrada en la constelación del Horno, que evidencia algunas variables cefeidas.

Abajo, la relación velocidad-distancia de las galaxias en el gráfico original de Hubble (de la obra de Hubble The Realm of Nebulae, *1936).*



MÁS ALLÁ DE LA DISPUTA, MÁS ALLÁ DE LOS PREJUICIOS

Podemos terminar con las palabras de Halton Arp, partidario del modelo cosmológico estacionario y de la falta de fundamento del Big Bang. Afirma que serán suficientes cinco años para esclarecer la disputa sobre los modelos cosmológicos y que entonces todos dirán que lo habían visto desde hacía mucho tiempo. Pero se puede ser más posibilista y pensar que las disputas científicas son hoy un modo de defender prejuicios y escuchar de nuevo las palabras de Edwin Hubble en la inauguración del telescopio de 200 pulgadas de Monte Palomar: «Esperamos sinceramente encontrar cualquier cosa que no esperábamos».

LOS OBSERVATORIOS DE MONTE WILSON Y MONTE PALOMAR

Dos observatorios californianos que han contribuido a la historia de la cosmología moderna. Edwin Hubble descubrió que el universo está en expansión utilizando los telescopios que, en aquella época, eran los más grandes del mundo.



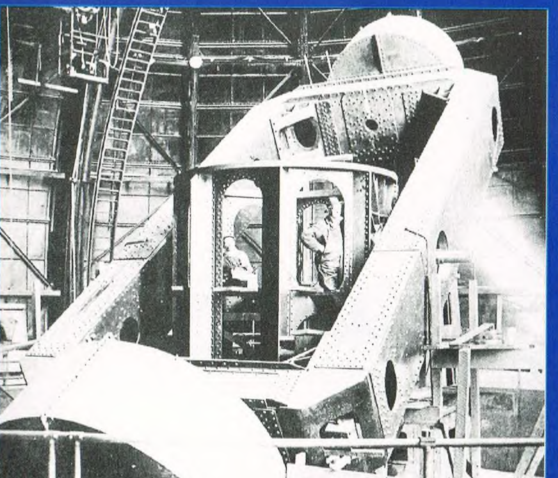
Ningún observatorio astronómico del mundo ha contado tanto en la historia de la moderna astronomía como los de Monte Wilson y Monte Palomar. La cosmología moderna, es decir, la ciencia que estudia el origen y la evolución del universo, nació en estos dos observatorios que, con sus instrumentos de grandes dimensiones, dominaron durante más de medio siglo el panorama mundial de la astronomía.

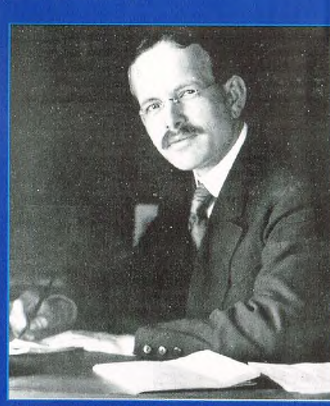
MONTE WILSON Y EL TELESCOPIO HOOKER

El observatorio de Monte Wilson fue fundado en 1904 sobre la homónima montaña de 1.742 m de altura, situada a unos 30 km de Los Ángeles, California. Fue financiado por la Carnegie Institution, una potente institución fundada en Chicago por un magnate del acero, Andrew Carnegie, que también se distinguió por sus actividades filantrópicas en el campo de la cultura, sobre todo científica. Pieza fundamental de la financiación fue George Ellery Hale, joven y brillante astrónomo que formaba parte del comité consultivo de la Carnegie Institution, dedicado al desarrollo de diversas ramas de la ciencia.

En su origen, el observatorio, que por primera vez se construyó deliberadamente sobre una inaccesible montaña porque ofrecía unas condiciones ideales de visibilidad, estaba destinado al estudio exclusivo del Sol, aunque los instrumentos instalados en él se utilizaban también para la observación de otros objetos celestes. Ya en 1908, con la instalación de un telescopio reflector de 152 cm, entonces el mayor del mundo, el observatorio se puso en la vanguardia de la investigación puntera en el campo de la astrofísica. Esta supremacía fue desplazada con la inauguración, en 1917, del histórico telescopio Hooker de 252 cm, que continuó siendo el mayor del mundo hasta 1948.

Abajo, fotografía de época de una fase de la construcción del telescopio Hooker de 2,5 metros.





Arriba, retrato fotográfico de George Ellery Hale, personaje fundamental en la historia de los grandes observatorios estadounidenses.

HUBBLE EN MONTE WILSON

Con este instrumento, Edwin Hubble, que entró en el equipo del observatorio en 1919 para pasar a ser más tarde su director científico, logró resolver

Arriba, fotografía de la torre solar del observatorio de Monte Wilson.

en estrellas las regiones periféricas de la galaxia de Andrómeda, descubriendo muchas cefeidas que permitieron determinar la distancia de aquella galaxia, que Hubble estimó en 900.000 años luz (la distancia correcta está hoy definida en 2,2 millones de años luz).

De este modo quedó establecido de manera definitiva que la Vía Láctea no era la única galaxia del universo, sino que existían muchísimas más, mucho más allá de la nuestra.

En definitiva, se trataba del nacimiento de la astronomía extragaláctica, es decir, de la rama de la astrofísica dedicada al estudio de los objetos que se encuentran más allá de la Vía Láctea.

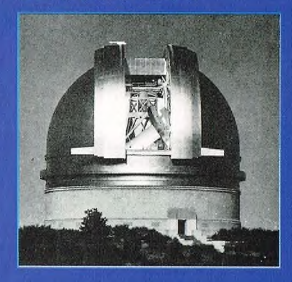
LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO

Siempre con el telescopio de 2,5 m, Hubble logró medir, con el método de las cefeidas, las distancias a algunas galaxias, descubriendo que dichas distancias están relacionadas con la velocidad con que se alejan. Esta relación entre distancia y velocidad de alejamiento es hoy conocida como la ley de Hubble, y es una de las más importantes de la astrofísica. El hecho de que todas las galaxias, excepto unas pocas locales, parecen alejarse de la nuestra con una velocidad proporcional a su distancia, sugirió a Hubble que el universo estaba en expansión y que las galaxias se comportaban como los fragmentos esparcidos por una explosión, la que había originado el propio universo: el Big Bang. Esto sucedía en 1929, cuando Estados Unidos ostentaba el monopolio de la investigación en el campo de la astronomía extragaláctica que, de hecho, sólo podía desarrollarse con grandes telescopios como el de Monte Wilson.

LA HISTORIA DE MONTE PALOMAR

Situado en la cima del monte homónimo, a unos 80 km al noreste de Los Ángeles (por tanto, vecino del Monte Wilson), el observatorio de Monte Palomar nació de una idea de Hale, que ambicionaba un telescopio de un tamaño enorme, dos o tres

Abajo, el edificio que alberga el telescopio Hale de 5 m, con la cúpula semiabierta.



ASTRÓNOMOS EN MONTE WILSON

El observatorio de Monte Wilson albergó a muchos astrónomos que, junto a Hubble y otros también famosos, contribuyeron a escribir algunas páginas fundamentales de la investigación astrofísica. Aquí queremos recordar algunos. Ritchey, experto en óptica, descubrió en 1917 una nova en la galaxia espiral NGC 6946, que contribuyó a la determinación de las distancias extragalácticas. Harlow Shapley participó en cambio en el célebre debate de 1920 con Curtis, dedicado a la naturaleza de los universos-isla. Bertil Lindblad, que estudió la manera de determinar la magnitud absoluta de las estrellas por medio de su espectro. Adrian van Maanen efectuó controvertidas medidas sobre la velocidad de rotación de las estrellas en el interior de las galaxias. Finalmente, Walter Baade que, junto con Fritz Zwicky, descubrió la diferencia entre las supernovas de tipo I y de tipo II y después resolvió en estrellas el núcleo de Andrómeda.

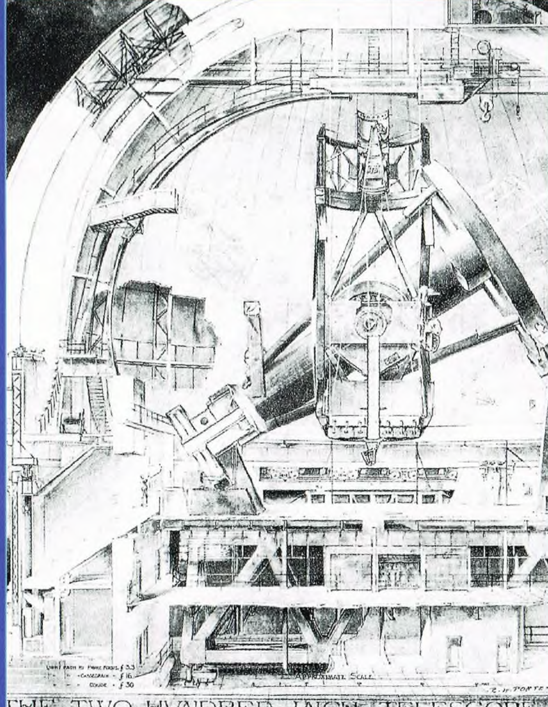
veces mayor que el telescopio Hooker, aunque no fuese seguro que pudiese realizarse un instrumento similar. Se encargó de buscar los fondos para un coste total que entonces era impresionante: cinco millones de dólares. Finalmente, obtuvo seis millones de dólares de la fundación Rockefeller, sólo un año antes de la gran recesión. Una empresa estadounidense empleó cuatro años para la realización del espejo (de 1931 a 1935), el cual fue transportado con un tren especial hasta Pasadena, donde se procesó ópticamente.

El telescopio fue inaugurado en 1948, diez años después de la muerte de Hale, quien no pudo ver terminado su proyecto. Pero el telescopio de 5 m recibió su nombre.

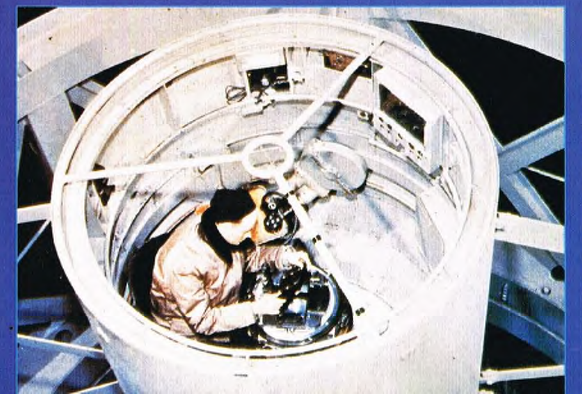
Edwin Hubble se hizo cargo de la supervisión científica de las operaciones del telescopio y, con él, midió las distancias de muchas galaxias, haciendo una clasificación de ellas y consiguiendo elaborar un mapa de la distribución de las galaxias del universo cercano.

EL TELESCOPIO SCHMIDT

En el observatorio de Monte Palomar también se encuentra otro telescopio muy famoso: el Schmidt, de 1,22 m. Se trata de un telescopio especial, exclusivamente diseñado para la fotografía que, gracias a una configuración óptica particular, permite obtener imágenes de grandes zonas del cielo prácticamente sin defectos ópticos. Con este instrumento, el mayor en su género (instalado también en 1948), se ha realizado un gran atlas fotográfico de todo el cielo visible desde Monte Palomar.



A la derecha, dibujo de la sección de la cúpula que aloja el telescopio Hale, terminado en 1948.



Hoy, estos dos grandes telescopios todavía están en funcionamiento (sobre todo Monte Palomar, porque Monte Wilson ha pasado por un período de inactividad). En sus principales instrumentos se han montado nuevos detectores electrónicos que permiten mejorar enormemente sus prestaciones. Sin embargo, la contaminación luminosa producida por las vecinas ciudades californianas impide tener cielos perfectamente oscuros y todos los telescopios de reciente construcción se han instalado en otros lugares: en los Andes chilenos, en volcanes hawaianos y en las montañas de las Islas Canarias, en una afanosa búsqueda de los últimos cielos sin contaminar de la Tierra.

En la fotografía se ve un astrónomo trabajando en el interior del telescopio Hale.



EN EL PRÓXIMO NÚMERO

EL SISTEMA SOLAR

ATMÓSFERAS DE PLANETAS GIGANTES

ESTRELLAS Y GALAXIAS

ESTRELLAS DE GRAN MASA

GUÍA DE LAS CONSTELACIONES

OFIUCO

LA EXPLORACIÓN DEL ESPACIO

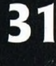
LA MISIÓN GALILEO

EL USO DEL ESPACIO

CONOCER EL TIEMPO

EL UNIVERSO

ENCICLOPEDIA DE LA ASTRONOMÍA Y EL ESPACIO



31

9 788439 554219 20031

PLANETA DeAGOSTINI



COMPOSICIÓN DE LA OBRA

Volumen 1	Fascículos 1	al	16
Volumen 2	Fascículos 17	al	32
Volumen 3	Fascículos 33	al	48
Volumen 4	Fascículos 49	al	64
Volumen 5	Fascículos 65	al	80

VENTA EN QUIOSCOS

Pida a su proveedor habitual que le reserve un ejemplar de EL UNIVERSO. Adquiriéndolo todas las semanas en el mismo punto de venta facilitará la distribución y obtendrá un mejor servicio.
Las tapas correspondientes a cada volumen se ponen a la venta con el fascículo que cierra el tomo. Con dicho fascículo se entregan las portadillas correspondientes.

Presidente: José Manuel Lara
Director General: Carlos Fernández
Director Editorial: Virgilio Ortega
Director General de Producción: Félix García
Coordinador General: Carles Dorico

© Editorial Planeta Argentina S.A.I.C.
Av. Independencia, 1668 - Capital Federal
Servicio de atención al cliente: Tel. (01) 482 - 0655 y 482 - 0657
Distribuye: Capital: Huesca-Sanabria,
Baigorri, 103, Capital Federal,
Interior: D.G.P., Alvarado, 2118, Capital Federal

© Editorial Planeta Mexicana, S.A. de C.V.
Av. Insurgentes Sur # 1162 - México D.F.
Servicio de atención al cliente: Tel. 575 13 48

© Editorial Planeta Colombiana, S.A.
Carrera, 68, n.º 25-55 - Santa Fé de Bogotá, D.C.
Servicio de atención al cliente: Tel. 9800 - 15315

© Editorial Planeta Chilena, S.A.I.C.
Olivares, 1229 - Santiago de Chile

ISBN Obra completa (con vídeo): 84-395-4148-1
Obra completa (sin vídeo): 84-395-4138-4
Fascículos (con vídeo): 84-395-4149-X
Fascículos (sin vídeo): 84-395-4139-2
Depósito legal: B-47.097-1997

Impresión: Cayfosa, Santa Perpètua de Mogoda, Barcelona
Impreso en España - Printed in Spain - Mayo 1998

Los editores se reservan el derecho de modificar el precio de venta de los componentes de la colección en el transcurso de la misma, si las circunstancias así lo exigieran.
Los editores garantizan la publicación de todos los fascículos que componen esta obra.

Fotografías: Lee Gibbons: cubierta, 116-117, 116ab., 117ar.; ESA/SPL: 107c.der.; E.T. Archive: 106ar.; Galaxy Picture Library: 101, 104, tercera de cubiertas; IGDA: 107ar.der.; Science Photo Library/Julian Baum: 106-107; Dr. Jeremy Burgess: 103 der.; Range: 111; Hugh Rowland: 110; Spectrum: 110, 111; US Naval Observatory: 112ar.izq.; Bristock-IFA: 114-115; BNSC/ESA: 118ab.; ESA: 118-119, 119ab., 120c.; Tony Stone Picture Library: 120ab.
Dibujos: Robin Carter/WLAA: 104-105, 117ab.; David A. Hardy: 102-103; Hugh Rowland: 105, 106ab., 120; Katz: 108-109; Sandra Russell/Black Hat: 112ar.; Julian Baum: 113; Farroxs: 116ar.; Robin Bottel: 115ab.; Spectrum Picture Library: 114ab.





ATMÓSFERAS DE PLANETAS GIGANTES

En las atmósferas de los planetas gaseosos soplan vientos fortísimos, y los ciclones pueden durar siglos.

Las atmósferas de los planetas exteriores presentan una química que se caracteriza no sólo por unos aspectos básicos comunes, sino también por diferencias importantes entre planeta y planeta.

Estudios espectroscópicos iniciados a partir de los años treinta han puesto de manifiesto la presencia de metano y amoníaco en la atmósfera de Júpiter. La existencia de hidrógeno, ya prevista teóricamente, se demostró mucho más tarde, en los años sesenta, porque las rayas de absorción del gas son muy débiles.

La composición química de Júpiter y Saturno es bastante similar. En cambio, Urano y Neptuno presentan unos porcentajes diferentes, quizá a causa de su estructura interna.

La abundancia de carbono, nitrógeno e hidrógeno en la atmósfera de Júpiter y Saturno permite pensar que los planetas gigantes gaseosos están compuestos de materia parecida a la de la nebulosa protosolar, la cual, al condensarse, dio origen a nuestra estrella.

Material similar al de la nebulosa ha sido hallado en los dos planetas mayores, en los cuales el vapor de agua está presente solamente en las regiones

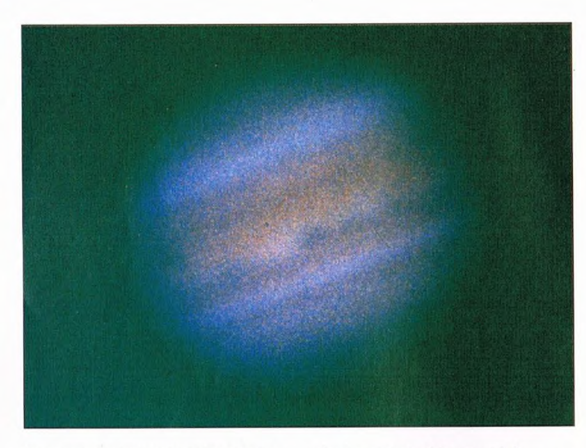
En la imagen, en primer plano, Titán y Saturno. Al fondo, la sonda del proyecto Cassini/Huygens, que debería explorar la atmósfera de esta enorme luna.

profundas de la atmósfera a causa de las temperaturas, demasiado bajas (–120 °C), que hay en las capas más altas de las nubes.

UN DESEQUILIBRIO QUÍMICO

Los espectros en el infrarrojo de los puntos calientes de Júpiter y Saturno, en los que aparecen unos cortes en la capa nebulosa, muestran la existencia de muchos compuestos que no deberían estar presentes en una atmósfera rica en hidrógeno y en equilibrio químico. En realidad, en este caso, los compuestos del carbono deberían transformarse en metano, mientras que el hidrógeno daría lugar a la formación de amoníaco. Pero aquí, la causa del desequilibrio que se ha creado es el Sol, especialmente la radiación ultravioleta que emite. Esta radiación escinde algunos compuestos, como el metano, y libera radicales libres, como CH_2 y CH_3. Es un efecto parecido al que causan los rayos en las nubes y el impacto de partículas cargadas procedentes de la magnetosfera situada más arriba. Los radicales pueden reaccionar con otro metano y formar etano y acetileno, liberando hidrógeno. La composición de las atmósferas de estos planetas, especialmente Júpiter, refleja un equilibrio dinámico entre la producción y la destrucción de estos hidrocarburos superiores.

El hecho de que se registre monóxido de carbono en los puntos de Júpiter con temperatura más alta, se explica por la presencia de cierta cantidad de oxígeno que puede provenir del vapor de agua de las capas internas o del anhídrido sulfuroso expulsado por los volcanes del satélite Ío y capturado por la gravedad del planeta.



Una imagen de Júpiter tomada con un potente telescopio desde la Tierra.

COMPOSICIÓN DE URANO Y NEPTUNO

Urano y Neptuno son unos planetas gaseosos especiales. El núcleo sólido de ambos es en proporción mayor respecto a la masa total que los de Júpiter y Saturno. La composición química de la atmósfera de los dos planetas se caracteriza por la presencia de hidrógeno molecular, helio y metano. Este último es el responsable de la coloración azulverdosa de Urano y Neptuno. El mecanismo consiste en la absorción selectiva, por parte del metano, de la radiación solar en el rojo, lo que hace que la luz reflejada por los dos planetas aparezca dominada por los colores verde y azul.

Debajo de las capas superficiales de la atmósfera, los compuestos principales –agua, amoníaco y metano– se condensan formando cristales y, a más profundidad, hielo. La temperatura de congelación del metano es inferior y, por tanto, las nubes más altas están formadas por este compuesto. La capa de nubes de metano oculta las formaciones de amoníaco y agua que hay bajo ellas, lo que explica por qué cuando se analiza el espectro infrarrojo de estos planetas no aparecen indicios de estos compuestos.



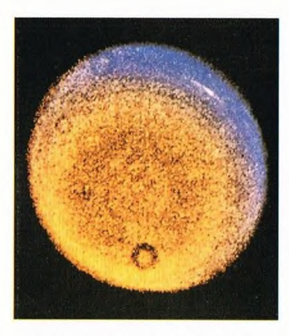
CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA

Aparte de Urano, que no presenta características destacadas y se nos muestra como un disco uniforme, todos los planetas gaseosos presentan en sus atmósferas estructuras más o menos complejas en movimiento: bandas, nubes y manchas.

La formación de bandas más o menos marcadas depende de la rotación diferencial (el ecuador gira a más velocidad que las regiones polares), una característica de los cuerpos gaseosos.

Las nubes que hay en los planetas gaseosos están dispuestas paralelamente al ecuador y son claras en el caso de corrientes ascendentes. En cambio, si corresponden a una corriente descendente, tienen una temperatura inferior y son oscuras.

A la izquierda, Saturno con sus bellísimos anillos, visto desde la Tierra.



Fotografía en falsos colores de Urano. Parecen verse algunos anillos, pero, en realidad, se trata de polvo depositado sobre la óptica.

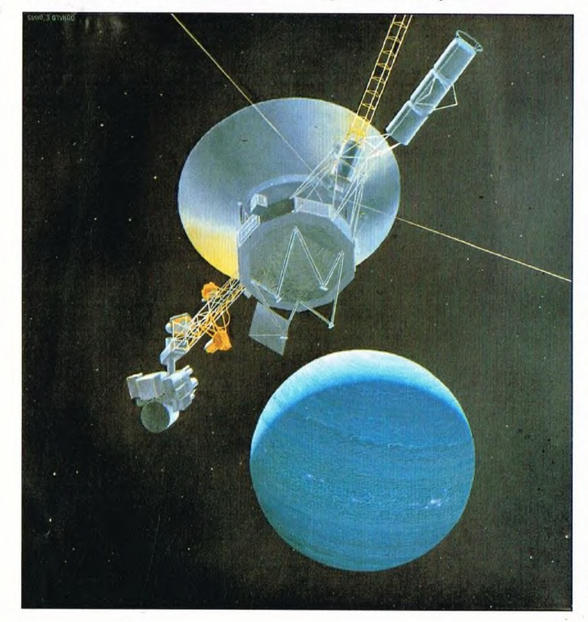
En la atmósfera terrestre, la circulación depende de la presencia de gradientes térmicos horizontales, es decir, de las diferencias de temperatura entre zonas. Esto se debe a que los rayos solares calientan más los trópicos, de manera que el aire polar, más frío, circula por encima del tropical, de temperatura más alta: la energía potencial debida a la gravedad se transforma en energía cinética, lo que genera un movimiento hacia arriba y hacia los polos.

En cambio, en el caso de los planetas gaseosos, este mecanismo no es el más importante, ya que las diferencias de temperatura entre el ecuador y los polos son mínimas. La radiación solar, dada su lejanía, no es muy energética y, por tanto, no puede generar diferencias de temperatura significativas (en Júpiter, menos de 3 °C).

Los datos facilitados por las sondas Pioneer y Voyager han confirmado que la radiación infrarroja emitida es independiente de la latitud. Uno de los motivos se descubrió cuando los científicos se dieron cuenta de que las atmósferas de Júpiter y de Saturno reciben la mitad de su calor no del Sol, sino del interior del planeta. En este caso, lo que ocurre es algo parecido al fenómeno que tiene lugar en el interior de una estrella, donde una fuente interna de calor debería producir un gradiente a lo largo de cada radio trazado desde el centro del planeta hasta la superficie.

EL COLOR DE LAS NUBES

Otra prueba del desequilibrio existente en los planetas gigantes la proporciona las partículas sólidas y líquidas que forman las nubes. Los vapores que se pueden condensar en una mezcla como la que los caracteriza son el agua, el amoníaco y el ácido sulfhídrico, presentes en forma de cristales y gotas. El problema radica en comprender por qué razón las nubes aparecen coloreadas, dado que los componentes citados son todos blancos. Un colorante típico podría ser el azufre en estado molecular, que da lugar a partículas de color amarillo y marrón. Otra hipótesis es que el fósforo elemental posee un color rojo similar al de la Gran Mancha Roja. A pesar de la formulación de teorías verosímiles, la causa de la coloración de las nubes todavía no está clara. En general, es posible establecer una relación entre el color de las nubes y su altura en la atmósfera. La asociación puede hacerse comparando las imágenes en el infrarrojo con las tomadas en el visible. Las fotografías en el infrarrojo permiten distinguir la temperatura de las nubes y, por tanto, su altura (las nubes más calientes son características de las capas profundas; las frías pertenecen a las capas más superficiales), mientras que las tomadas en el visible muestran sus colores. Un ejemplo: las nubes de Júpiter en la superficie son rojas; las inmediatamente inferiores son blancas; en profundidad son marrones y, finalmente, las que hay debajo de éstas son azules.

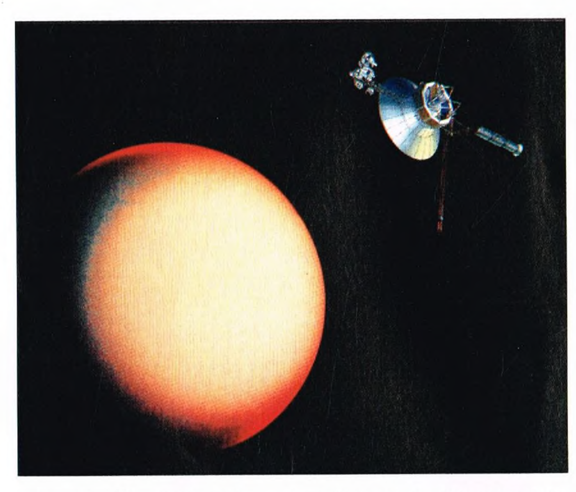


CALOR HACIA LOS POLOS

Como la capa de la atmósfera de los planetas gaseosos que recibe la luz solar equivale a una millonésima de la masa de las regiones internas, puede pensarse que la circulación atmosférica está directamente relacionada con el interior.

Teniendo en cuenta estas condiciones, es posible imaginar que todos los puntos de la superficie planetaria estarían unidos a las partes centrales del planeta por conductores de calor muy eficaces, mientras que unos conductores débiles permitirían la unión con las partes más altas de la atmósfera. La consecuencia de estos razonamientos permite suponer que se

A la izquierda, un dibujo que representa la sonda Voyager 2 y Neptuno, planeta al que llegó en 1989.



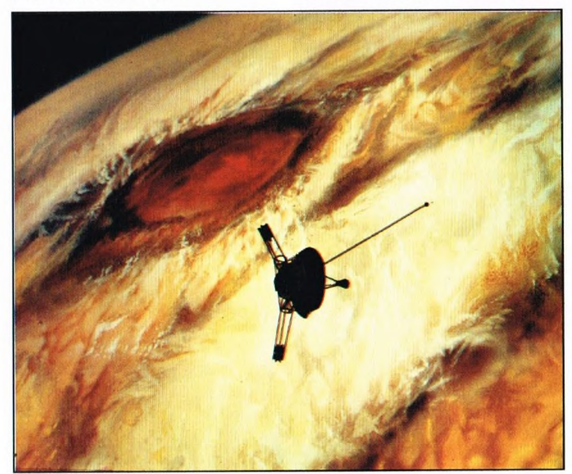
El dibujo muestra la sonda Voyager 2 llegando a las proximidades de Urano (enero de 1986).

producen movimientos convectivos con transferencia de calor hacia las regiones polares. Además, según este modelo, todo el fluido interno del planeta intervendría en la transferencia de calor hacia los polos. La disminución de temperatura en dirección a éstos quedaría, pues, equilibrada por el calor producido en el interior, que se desplazaría precisamente hacia las regiones polares. Esto explicaría por qué no existen grandes diferencias de temperatura con la variación de la latitud.

UNA METEOROLOGÍA DE TIPO TERRESTRE

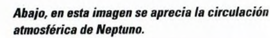
Otro modelo de circulación atmosférica se basa en algunos supuestos derivados de los modelos usados en las previsiones meteorológicas terrestres. Para explicar los movimientos atmosféricos, se utilizan los mismos parámetros de la Tierra, pero con valores numéricos reducidos. Estos parámetros describen la velocidad a la que la atmósfera pierde calor y cantidad de movimiento a causa del roce. En el caso de los planetas gaseosos, estos parámetros se han adaptado teniendo en cuenta que allí los vientos no discurren por encima de una superficie sólida como en la Tierra.

Abajo, en el dibujo se ve la sonda estadounidense Pioneer cerca de la Gran Mancha Roja de Júpiter.

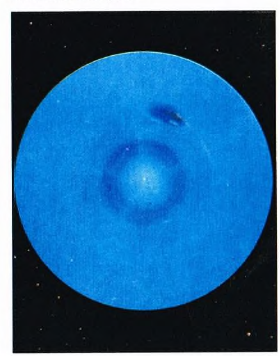


Esta teoría, a diferencia de la anterior, sostiene que la parte de la atmósfera no iluminada por el Sol no influye en la parte que está más arriba. Los estratos superiores, por tanto, serían completamente independientes e impermeables a lo que ocurre en el interior. Las hipótesis se verían justificadas si entre ambos estratos existiera una diferencia de densidad, respecto a la de los estratos superiores, más pequeña que la de los puntos internos (un ejemplo es el del agua de los océanos, caliente en la superficie y fría en las profundidades). No obstante, cuando se trata de planetas gaseosos, con un fluido que transfiere calor hacia arriba, es difícil considerar este supuesto cierto.

El modelo, sin embargo, consigue explicar una de las características más extrañas de las atmósferas de los planetas gaseosos. Al estudiar el movimiento de los



Abajo, en esta imagen se aprecia la circulación atmosférica de Neptuno.





Arriba, todos los planetas gaseosos poseen una rotación diferencial que genera franjas coloreadas; en la fotografía, Saturno.

vientos, es posible observar que éstos proceden, alternativamente, del este y del oeste. Mientras que en la Tierra los vientos, en las latitudes más bajas, soplan hacia el oeste, y en las latitudes medias hacia el este, en los planetas gigantes los vientos tienen muchas direcciones alternativas. Según esta teoría, estas variaciones se deberían a la presencia de torbellinos alimentados por el gradiente térmico (mantenido por los rayos del Sol) entre el ecuador y los polos.

UNA PÉRDIDA INICIAL

Entre todos los gigantes gaseosos, solamente Urano presenta una uniformidad aparente y una actividad atmosférica menor. Esto se podría deber a que sólo el 30% del calor irradiado proviene del interior, mientras que el 70% restante se debe a la radiación solar. Por el contrario, en el caso de los otros tres planetas, la relación se invierte, y la mayor parte del calor emitido llega de las zonas más profundas. Muy probablemente, Urano perdió una cantidad significativa de calor interno en las fases iniciales de su formación.

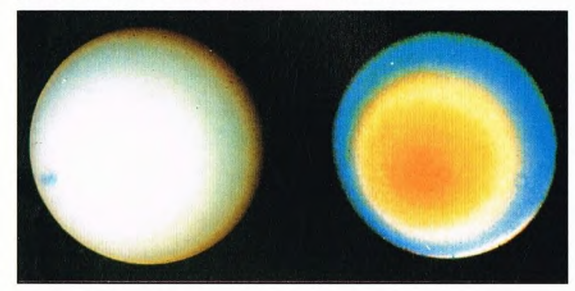
La circulación atmosférica es muy especial: los datos de las sondas han puesto de manifiesto la presencia de vientos este-oeste y una débil estructura en bandas con nubes poco más luminosas que el fondo. Este tipo de circulación es parecido al de los otros planetas. Pero lo extraño es que se esperaba algo diferente, ya que Urano es el único planeta que tiene su eje de rotación en el plano de revolución alrededor del Sol. Por esto, el Sol se encuentra en el cenit sobre el polo y no sobre el ecuador. Esto significa que, a pesar de que el Sol suministra energía para alimentar los movimientos de la atmósfera, en cambio, no determina su comportamiento. La circulación está influida por la rotación mediante un agente, la fuerza de Coriolis, que dirige los vientos hacia zonas que tienen una misma latitud.

LAS MANCHAS

En todos los planetas gaseosos, excepto Urano, hay unas estructuras ciclónicas, denominadas manchas, que persisten durante mucho tiempo. La mayor y más importante es la Gran Mancha Roja de Júpiter, pero también Neptuno posee una que los científicos han llamado la Gran Mancha Oscura. La difusión de estos objetos hace pensar que existen mecanismos comunes y dependientes de la estructura interna de los planetas. Se cree que pueden ser torbellinos (como los ciclones terrestres) que giran alrededor del planeta discurriendo entre las corrientes este-oeste como cojinetes de bolas. La ausencia de rozamiento con una superficie sólida permite una duración que en la Tierra es imposible. Por ejemplo, la Gran Mancha Roja de Júpiter ya fue observada por Galileo. El origen de las manchas todavía no se comprende totalmente, aunque se han propuesto algunas hipótesis sobre los mecanismos de mantenimiento de estas enormes estructuras. Unas aluden a un desplazamiento coherente del flujo en dirección norte-sur en vez de la normal este-oeste; otras se basan en la idea de que los movimientos convectivos de las regiones profundas pueden influir en las capas superiores.

EL MOVIDO NEPTUNO

Tiene una circulación atmosférica muy veloz, con manchas parecidas a las de Júpiter y Saturno, y sistemas nubosos en evolución constante. La dinámica de Neptuno es superior a la de Júpiter, que tiene un gran cromatismo en las nubes, las cuales, Mancha Roja aparte, forman un estrato uniforme. La atmósfera está recorrida por unas nubes empujadas por vientos que soplan incluso a 2.000 km/h y se mueven en sentido contrario al de la rotación. La velocidad de estos vientos disminuye progresivamente a medida que los polos están más cercanos. Las formaciones nubosas se deben probablemente al recorrido del metano, empujado hacia arriba por corrientes ascendentes. Se hiela por las bajas temperaturas y da origen a las nubes, que luego son arrastradas hacia abajo por corrientes descendentes hasta una zona más cálida, donde se dispersan.



A la izquierda, dos imágenes de Urano procesadas por ordenador. Alrededor de la figura de la derecha se ve una capa de neblina.

LA EVOLUCIÓN DE LAS ESTRELLAS DE GRAN MASA

Según sea su masa, la vida de una estrella sigue varios caminos. Las de mayor masa acaban su existencia más rápidamente que las estrellas como el Sol, y también concluyen su ciclo vital de una manera mucho más espectacular. Pero, a veces, esta muerte es sólo aparente y súbitamente vuelven a resurgir a una nueva vida, aunque bajo otra forma. En muchos casos, la muerte de una estrella de gran tamaño es sólo el preludio de la formación de otros cuerpos estelares: las estrellas de neutrones y los agujeros negros.

La vida de una estrella cualquiera empieza con la agregación de gases, sobre todo hidrógeno, y un cierto porcentaje de polvo interestelar dentro de una gigantesca nube primordial. Cuando en el interior de la nube se alcanza una densidad crítica, la atracción gravitatoria entre las moléculas gaseosas es lo suficientemente intensa para prevalecer sobre su movimiento térmico, y la nube empieza a contraerse formando una estructura intermedia llamada protoestrella. Después de la contracción, el gas de las regiones centrales de la protoestrella se calienta por fricción dinámica y alcanza temperaturas muy elevadas (del orden de millones de grados).

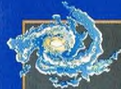
Esta temperatura provoca reacciones de fusión nuclear. La primera cadena de reacciones consiste en la fusión de núcleos de hidrógeno para formar núcleos de helio. La energía liberada equilibra la gravedad, y la estrella alcanza una configuración de equilibrio. En esta fase de su evolución, la estrella se encuentra idealmente en la secuencia principal del diagrama de Hertzsprung-Russell (H-R) y ahí permanece durante el 90% de su existencia.

LOS TIEMPOS DE LA EVOLUCIÓN ESTELAR

Los tiempos de la evolución estelar dependen de la masa y, en menor medida, de la composición química inicial. Por ejemplo, las estrellas de mayor



A la izquierda, fotografía de la nebulosa con cúmulo abierto M16 en la constelación de la Serpiente. En esta nube hay muchas estrellas O y B de gran masa.



REACCIONES NUCLEARES EN ESTRELLAS MASIVAS

Fusión del hidrógeno (temperatura > 10 millones de grados):
En las estrellas, la fusión del hidrógeno ocurre mediante un proceso de varias fases que se inicia con las cadenas protón-protón y prosigue con el llamado ciclo CNO, que tiene como catalizadores el carbono y otros núcleos producidos en reacciones intermedias.

$^{12}_{6}C + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{13}_{7}N + \gamma$ + energía
$^{13}_{7}N \rightarrow ^{13}_{6}C + ^{0}_{1}e + \nu$ + energía
$^{13}_{6}C + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{14}_{7}N + \gamma$ + energía
$^{14}_{7}N + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{15}_{8}O + \gamma$ + energía
$^{15}_{8}O \rightarrow ^{15}_{7}N + ^{0}_{1}e + \nu$ + energía
$^{15}_{7}N + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{12}_{6}C + ^{4}_{2}He$ + energía

Fusión del helio (= 100 millones de grados):
$^{4}_{2}He + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{8}_{4}Be + \gamma$ + energía
$^{4}_{2}He + ^{8}_{4}Be \rightarrow ^{12}_{6}C + \gamma$ + energía

Fusión del carbono (= 800 millones de grados):
$^{12}_{6}C + ^{12}_{6}C \rightarrow ^{24}_{12}Mg + \gamma$ + energía
$\rightarrow ^{23}_{11}Na + ^{1}_{1}H$ + energía
$\rightarrow ^{20}_{10}Ne + ^{4}_{2}He$ + energía
$\rightarrow ^{23}_{12}Mg + n$ − energía
$\rightarrow ^{16}_{8}O + 2^{4}_{2}He$ − energía

Fusión del neón (= 1.500 millones de grados):
$^{20}_{10}Ne + \gamma \rightarrow ^{16}_{8}O + ^{4}_{2}He$ + energía
$2^{20}_{10}Ne + \gamma \rightarrow ^{16}_{8}O + ^{24}_{12}Mg + \gamma$ + energía

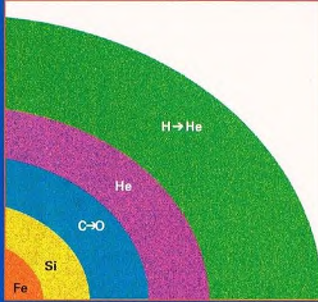
Fusión del oxígeno (= 2.000 millones de grados):
$^{16}_{8}O + ^{16}_{8}O \rightarrow ^{32}_{16}S$ + energía
$\rightarrow ^{31}_{15}P + ^{1}_{1}H$ + energía
$\rightarrow ^{31}_{16}S + n$ + energía
$\rightarrow ^{28}_{14}Si + ^{4}_{2}He$ + energía
$\rightarrow ^{24}_{12}Mg + 2^{4}_{2}He$ − energía

Fusión del silicio (> 3.000 millones de grados):
Después de la fusión de carbono y oxígeno, los núcleos más abundantes en el interior estelar son el silicio y el magnesio. En el ciclo siguiente, estos elementos se disocian en núcleos más ligeros mediante el bombardeo de fotones de elevada energía producidos en las reacciones anteriores. Este proceso se conoce con el nombre de fotodesintegración.

En casos extremos, estos elementos sufren posteriores transformaciones termonucleares y el núcleo de la estrella se transforma casi totalmente en hierro. Entonces, la cadena nuclear se detiene, ya que es imposible desencadenar espontáneamente la fusión del hierro. Por tanto, la estrella ha agotado todos sus recursos de combustible nuclear y, como no son posibles otras reacciones, va hacia la contracción última y definitiva. En la práctica, esto determina su muerte.

masa queman con más rapidez su combustible nuclear que las estrellas de masa similar a la solar y, precisamente por este motivo, son también las más luminosas. En efecto, si M_s es la masa de una estrella, su luminosidad es directamente proporcional a $M_s^{10/3}$. De una manera simple, podemos decir que el tiempo de permanencia de una estrella en la secuencia principal viene determinado por la relación entre la cantidad de combustible nuclear (proporcional a su masa M_s) y el ritmo con el que éste es quemado (proporcional a la cantidad de energía irradiada por unidad de tiempo, es decir, la luminosidad). De este modo, se sabe que el citado tiempo es inversamente proporcional a $M_s^{7/3}$. Las estrellas de mayor masa, por tanto, permanecen en la secuencia principal durante un período más breve, lo que significa que su evolución es también mucho más rápida. Por ejemplo, si en el Sol este tiempo es de unos 10.000 millones de años, en una estrella de masa 10 veces superior es de sólo 50 millones.

En muchos casos, las estrellas de gran masa se forman en grupos. Por tanto, todas tienen la misma edad y se concentran en la misma región celeste. Éste es el caso, por ejemplo, de la familia de estrellas gigantes que hay en el interior del cúmulo 30 **Doradus.**



Arriba, si se pudiese seccionar idealmente una estrella de masa superior a 10 o 12 masas solares durante una de las fases más avanzadas de su evolución (la de gigante roja), se vería una estructura compuesta de capas concéntricas en el interior de las cuales tienen lugar reacciones de fusión cada vez más complejas. La mayor parte del volumen de la estrella lo constituirían unas capas superficiales expandidas: una esfera con un diámetro aproximado de 1.500 millones de km que podría fácilmente llenar la órbita de Júpiter. Avanzando hacia las regiones más centrales encontraríamos la capa donde se produce la fusión del hidrógeno, luego del helio, del carbono, del neón, del oxígeno y del silicio hasta llegar al núcleo de la estrella, compuesto totalmente de hierro nuclearmente inerte.

La existencia de las estrellas se basa en este delicado equilibrio entre presión y gravedad. Esta condición, sin embargo, no es estable, ya que la reserva de hidrógeno, aunque grande, está destinada, antes o después, a agotarse. El momento depende de la rapidez con que la estrella consuma su combustible nuclear, lo cual, a su vez, depende





Una de las estrellas más masivas de nuestra Galaxia es Eta Carinae. Su masa es unas 100 veces superior a la de nuestro Sol e irradia mucha más energía. La luminosidad de esta estrella equivale a la de 5 millones de estrellas como el Sol.

fundamentalmente de su propia masa. Cuando la estrella entra en «reserva» de hidrógeno, el proceso de fusión se hace más lento y, por tanto, se atenúa también la presión de la radiación. Esto hace que la estrella avance hacia una nueva contracción gravitatoria, después de la cual su núcleo se calienta. En este punto, el destino de la estrella está determinado únicamente por su masa inicial.

LAS FASES POSTSECUENCIA PRINCIPAL

Si la estrella tiene una masa inferior aproximadamente a un cuarto de la masa solar, el aumento de temperatura de las regiones centrales provoca una expansión temporal de sus estratos más externos, pero es insuficiente para poner en marcha de nuevo la fusión del hidrógeno. Al cabo de poco tiempo, la estrella vuelve a contraerse, para luego apagarse lentamente. El residuo de esta estrella se denomina enana blanca de helio. En cambio, si la estrella tiene una masa superior a ~0,25 M_{Sol}, el aumento de temperatura debido a su contracción es suficiente para iniciar la fusión del helio mientras la fusión del hidrógeno residual se desplaza hacia las capas más externas: la estrella se expande y se convierte en una gigante roja. En estrellas de esta masa, la contracción gravitatoria puede inducir un aumento de temperatura tan inmediato, que provoca rápidamente la fusión del helio, produciendo un relámpago de energía conocido como *flash* del helio. Con la fusión de este gas, el impulso hacia el exterior vuelve a equilibrar la atracción gravitatoria, la contracción de la estrella se detiene y su estructura interna se reajusta. También ahora la estrella llega a consumir su reserva de combustible nuclear (en este caso, el helio) y sufre un nuevo, y definitivo, colapso. El aumento de temperatura consiguiente ya no es suficiente para desencadenar nuevas reacciones

A la derecha, el dibujo grande representa la sección interior de una estrella de gran masa con su estructura característica en capas.

Capa formada principalmente por hidrógeno

Capa formada principalmente por helio

Capa formada principalmente por carbono

Capa formada principalmente por oxígeno

Capa formada principalmente por silicio

Capa de hidrógeno que funde para formar helio

Capa de helio que funde para formar carbono

Capa de carbono que funde para formar oxígeno

Capas sucesivas de neón (que funde para formar oxígeno y magnesio) y de oxígeno (que funde para formar silicio)

Capa de silicio que funde para formar el núcleo de hierro

UNA VIDA QUEMADA

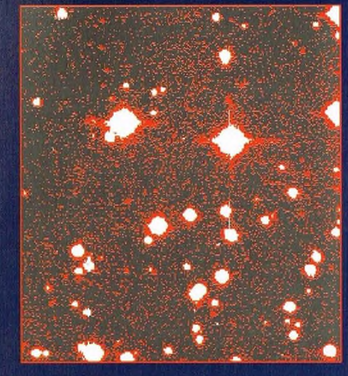
Las estrellas de gran masa, es decir, de 20 o más masas solares, tienen una vida breve y turbulenta.
En su interior, el hidrógeno se quema tan rápidamente que en pocas decenas de millones de años se hacen inestables.
En general, su existencia acaba con una explosión espectacular de supernova que puede dejar como resto una estrella de neutrones o un agujero negro.

nucleares, y la estrella se apaga lentamente precipitándose sobre su núcleo. Lo que queda es un cuerpo estelar muy denso, con una masa que equivale aproximadamente a la del Sol, concentrada en una esfera de las dimensiones de la Tierra: es una enana blanca, rica en carbono y oxígeno.

ESTRELLAS DE GRAN MASA

En una estrella de masa superior a unas 10 o 12 masas solares, estas fases se repiten varias veces durante su existencia. Cuando el combustible nuclear que ha alimentado la estrella hasta un momento determinado está próximo a la extinción, la estrella sufre una nueva contracción que, a su vez, provoca otro calentamiento más intenso de su núcleo. De esta manera se desencadenan nuevas reacciones de fusión que, ahora, utilizan los productos sintetizados durante las reacciones anteriores, pero que se prolongan durante un tiempo inferior. La duración de esta cadena depende, una vez más, de la masa de la estrella: cuanto mayor es ésta, más numerosos son los ciclos de fusión por los que pasa durante su existencia. Durante estas fases de inestabilidad, la luminosidad de la estrella sufre

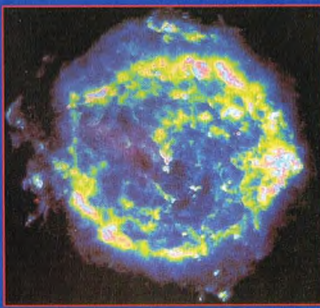
Abajo, imagen infrarroja del objeto GRO JI 744-28. Este tipo de imágenes se utiliza para identificar las contrapartidas ópticas de fuentes X en las que podría esconderse un púlsar.



REACCIONES NUCLEARES EN EL INTERIOR

Masa estelar	Reacciones de fusión	Resultado final
$\lesssim$ 0,25 $M_{\odot}$	hidrógeno → helio	enana blanca de helio
0,25 - 10 $M_{\odot}$	hidrógeno → helio helio → carbono	enana blanca de carbono-oxígeno
10 $M_{\odot}$ - 12 $M_{\odot}$	hidrógeno → helio helio → carbono carbono → oxígeno	enana blanca de oxígeno-neón-magnesio
>12 $M_{\odot}$	hidrógeno → helio helio → carbono carbono → oxígeno neón → oxígeno + magnesio oxígeno → silicio silicio → hierro	estrella de neutrones o agujero negro

Las reacciones nucleares posibles en el interior de una estrella están reguladas esencialmente por su masa. En estrellas masivas, las reacciones de fusión nuclear se suceden hasta la síntesis de núcleos cada vez más pesados, el último de los cuales es el hierro. Cuando todas las reacciones nucleares posibles en una estrella de determinada masa se han extinguido, la estrella se dirige hacia su fin y, según su masa originaria, puede convertirse en una enana blanca, una estrella de neutrones o un agujero negro.
$M_{\odot}$= Masa del Sol.



La muerte de una estrella de gran masa sobreviene cuando todas las reacciones nucleares posibles en su interior se han agotado. En tal caso, la estrella va hacia su contracción última y definitiva. El aumento de temperatura resultante dispara reacciones termonucleares incontrolables que conducen rápidamente a la explosión de la estrella, produciendo una explosión de supernova.

Abajo y a la derecha, la estrella progenitora de la supernova SN 1987A era, con toda probabilidad, una estrella de masa muy superior a la del Sol. Según las teorías de la evolución estelar, debía tratarse de una supergigante de 20 masas solares.





variaciones continuas a medida que cambia su radio, por lo que se nos aparece como una estrella variable. Las cefeidas son un ejemplo clásico de estrellas que atraviesan esta fase evolutiva. El primer paso es la fusión del carbono, del neón y del oxígeno, mientras que la fusión del helio se desplaza hacia una capa más externa.

LA TEMPERATURA DE FUSIÓN

Naturalmente, a medida que las reacciones de fusión van haciéndose más complejas, aumenta la temperatura. Como los núcleos atómicos están constituidos por protones y neutrones, están cargados positivamente (como se sabe, los neutrones no tienen carga) y, según la ley de Coulomb, las reacciones de fusión se ven obstaculizadas por la fuerza de repulsión de naturaleza electrostática ejercida por los núcleos que intervienen en ellas. Por esto, los núcleos que reaccionan han de estar dotados de una energía cinética suficientemente elevada para vencer su mutua repulsión, por lo que se les debe suministrar energía en forma de calor. Dado que la repulsión electrostática entre los núcleos aumenta con el producto de las cargas eléctricas (es decir, con el número de protones), para obtener la fusión de los núcleos pesados (los que tienen una gran cantidad de neutrones y protones), el aumento de temperatura ha de ser enorme.

Por tanto, la estrella adquiere una estructura de capas concéntricas dentro de las cuales se consuman las últimas fases de las reacciones de fusión de los ciclos anteriores. En las regiones más externas, se queman los elementos más ligeros, puesto que es allí donde la temperatura es más baja. En cambio, los más pesados se queman en las regiones centrales, donde, por el contrario, la temperatura tiende a aumentar. En las estrellas de 10 masas solares, se llega hasta la combustión del carbono y del neón, proceso que puede tener un carácter más o menos violento. Si la estrella tiene una masa todavía superior, se producen elementos cada vez más pesados, como el magnesio (Mg), el silicio (Si), o el azufre (S).

LA MUERTE DE LAS ESTRELLAS MASIVAS

Lo mismo que su vida, también el fin de estos colosos viene determinado por su masa. Si la estrella tiene una masa superior a 10 masas solares, las últimas fases de su evolución son altamente



inestables, y en sus diversas capas se inician reacciones nucleares incontrolables que provocan una explosión de supernova. Durante esta explosión, pueden tener lugar reacciones nucleares episódicas que conducen a la formación de núcleos todavía más pesados que el hierro (por ejemplo, el oro). Este fenómeno se llama nucleosíntesis explosiva. En cierto sentido, impresiona pensar que el oro del que está formado un anillo o un collar procede de la explosión de alguna supernova ocurrida en una región ignorada de la Galaxia. Entretanto, las interacciones entre protones y electrones en el núcleo estelar han convertido a éste en neutrones. Después de la explosión de una supernova, los estratos superficiales de la estrella son expulsados, mientras que el núcleo se precipita sobre sí mismo aumentando desmesuradamente su densidad. En el interior de una estrella de neutrones, la densidad es tan elevada, que la materia se encuentra en condiciones distintas de las que conocemos. La distancia entre los neutrones es tan pequeña, que los efectos cuánticos son importantes y no pueden aproximarse más sin violar el principio de exclusión de Pauli. Esto hace que el núcleo estelar sea incompresible; es así cómo consigue soportar la contracción gravitatoria de la estrella.

EL PRINCIPIO DE EXCLUSIÓN DE PAULI Y LAS ESTRELLAS DE NÚCLEO DEGENERADO

El principio de exclusión de Pauli (que toma su nombre del físico alemán Wolfgang Pauli) se aplica a todas las partículas pertenecientes a la familia de los fermiones, por ejemplo, los electrones y los neutrones. Según este principio, en un instante determinado, sólo dos fermiones pueden ocupar el mismo nivel de energía en un cierto volumen del espacio. Cuando un gas de fermiones está comprendido en un volumen suficientemente pequeño, todos los posibles niveles de energía están ocupados; por tanto, el número total de fermiones en aquel volumen no puede aumentar (exactamente como en un cine en el que se han ocupado todos los asientos). En estas condiciones, se dice que la materia se encuentra en estado degenerado. Por otra parte, el principio de exclusión prevé que el volumen que puede ocupar un grupo de fermiones es más pequeño cuanto mayor es la masa de las partículas. Por ejemplo, los neutrones tienen una masa igual a 2.000 veces la de los electrones y pueden, por tanto, estar más «empaquetados».

El núcleo de materia que queda se convierte en una estrella de neutrones que gira vertiginosamente sobre sí misma, y se hace detectable como un púlsar radio. Si la masa de la estrella de neutrones excede ~3 M_{Sol}, los últimos instantes aún son más dramáticos. En efecto, la presión gravitatoria debida al colapso es tan elevada, que obliga a los neutrones del núcleo a violar el principio de exclusión de Pauli y a «empaquetarse» hasta alcanzar densidades inimaginables. Este fenómeno da lugar al colapso gravitatorio completo y provoca la formación de un agujero negro. A pesar de que, en cierto sentido, la estrella de neutrones pasa a ser un púlsar, apreciable durante algunos centenares de miles de años como fuente radio, el destino de un agujero negro es desaparecer definitivamente de los medios de detección de los astrónomos y permanecer oculto en algún rincón de la Galaxia.

Arriba, la muerte de uno de estos colosos estelares es sólo el preludio de la formación de objetos diversos: las estrellas de neutrones y los agujeros negros. Pero entretanto, las estrellas de neutrones se convierten en fuentes radio pulsantes (púlsares), con lo cual manifiestan su presencia. Los agujeros negros son prácticamente indetectables.

OFIUCO

Ofiuco, o el Serpentario, es una de las mayores constelaciones de la bóveda celeste. Aunque está atravesada por la eclíptica, no forma parte de las constelaciones zodiacales.



En la región norte de Escorpión hay una constelación de grandiosas proporciones: es Ofiuco, el hombre que sostiene entre sus manos una serpiente, dividiendo la constelación en dos partes: la cabeza y la cola.

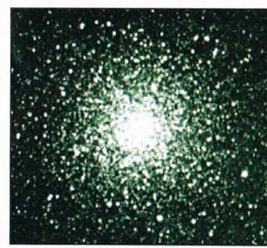
CÓMO LOCALIZAR LA CONSTELACIÓN

Las estrellas de Ofiuco dibujan en el cielo un gran anillo irregular situado entre la constelación de Hércules y la de Escorpión. El astro más brillante de Ofiuco, Alfa, está situado en el firmamento a unos 5° al este, es decir, a la izquierda de Alfa *Herculis*, Ras *Algethi*.

ESTRELLAS NOTABLES

Alfa (magnitud 2,1), llamada Ras *Alhague*, la cabeza del encantador de serpientes, es una estrella de luz blanca con un compañero invisible que orbita a su alrededor en unos 8 años. El espectro de Alfa presenta unas fuertes rayas de absorción debidas a la materia que hay entre nosotros y el astro. Como se encuentra sólo a 54 años luz de la Tierra, la explicación más plausible de este fenómeno hay que buscarla en la presencia de una nube de materia difusa que envuelve la estrella.

Beta (magnitud 2,8) o Kelb Alrai, está a doble distancia respecto a Alfa, y también es de superficie más fría, como lo manifiesta su luz rojiza.



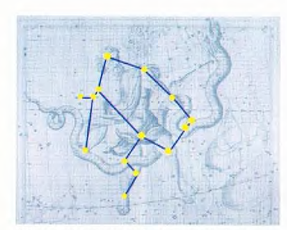
Arriba, fotografía del cúmulo globular M12, en Ofiuco. Su distancia es de 2.000 a 3.000 años luz.

Rho está formada, en realidad, por cuatro estrellas, separables con pequeños instrumentos: la principal tiene una magnitud de 5,3 y está al lado, a 4", de una compañera (magnitud 6). Cerca de estas dos estrellas pueden observarse otras dos de magnitud 7,9 y 7.

En cambio, Tau (magnitud 5,2) está formada por dos estrellas que orbitan una alrededor de la otra en 280 años. Para separarlas, se necesita un instrumento con apertura no menor de 7,5 cm.

LA ESTRELLA DE BARNARD

Observable incluso con telescopios pequeños o con unos gemelos, la estrella de Barnard toma su nombre del astrónomo estadounidense que la estudió. Se trata de una enana roja de magnitud 9,5 y está entre las más próximas al Sol, a sólo 6 años luz de nosotros. Esta distancia la coloca inmediatamente después del sistema de Alfa *Centauri*. Su peculiaridad radica en el hecho de que es la estrella dotada de mayor movimiento propio que se conoce. Se desplaza por el firmamento cubriendo un ángulo equivalente a 10,29" al año. Esto significa que tarda 175 años en atravesar una región del firmamento que tiene un diámetro igual al aparente del disco lunar.



Ofiuco está representado con una serpiente en sus manos; por eso se le llama también el Serpentario.

OTROS OBJETOS EN OFIUCO

Ofiuco contiene muchos cúmulos, tanto abiertos como globulares. A esta última categoría pertenecen los numerosos objetos de Messier de la constelación: M9, M10, M12, M14, M19, M62, M107.

Los más luminosos son M10 y M12, de séptima magnitud. En los instrumentos pequeños aparecen como manchas luminosas, pero aperturas superiores a 15 cm permiten resolver cada una de las estrellas. Además de estos objetos, también son dignos de mención los cúmulos abiertos NGC 6633 e IC 4665, observables con gemelos, y la nebulosa planetaria NGC 6572, de décima magnitud.

LOS MITOS Y LAS ESTRELLAS

OFIUCO

Las tradiciones sobre Ofiuco cuentan dos leyendas distintas sobre esta constelación. Según una de ellas, se trataría de Esculapio, el mítico hijo de Apolo que aprendió del centauro Quirón el arte de la medicina. Esculapio fue tan hábil en la práctica médica que consiguió resucitar a los muertos. Por eso, Plutón, dios del reino de ultratumba, intervino cerca de Júpiter para que lo matase. Júpiter le complació, pero Apolo se encolerizó hasta tal punto por la muerte de su hijo que eliminó a los cíclopes que preparaban los rayos de Júpiter. Para reparar de algún modo la muerte de Esculapio, Júpiter se vio obligado a ponerle en el cielo como constelación. Según otra tradición, el Serpentario está asociado al mítico Enkidu, amigo de Gilgamesh.

DÓNDE BUSCARLA

OFIUCO

Ofiuco, la Serpiente, constituye una vasta constelación irregular limitada por Hércules *(Hercules)*, la cabeza de la Serpiente *(Serpens Caput)* y la cola *(Serpens Cauda)*, el Águila *(Aquila)*, Sagitario *(Sagittarius)* y Escorpión *(Scorpius)*.
Ocupa una región del cielo comprendida entre las 16 horas y las 18 horas 40 minutos de ascensión recta, aproximadamente, y entre 30° S y 15° N de declinación, aproximadamente.



NGC 6633
NGC 6572
Ras Alhague
Bernard
IC 4665
SERPENS CAPUT
Kelb Alrai
10°
AQUILA
OPHIUCHUS
M14
Tau
0°
M12
M10
SERPENS CAUDA
Yed Prior
-10°
18h
M9
Gabil
M107
-20°
M19
Rho
16h
LIBRA
M62
LEYENDAS
Magnitud de las estrellas
0 1 2 3 4 5
Cúmulos globulares
Nebulosas planetarias
Cúmulos abiertos
Límite de las constelaciones
Paralelos y meridianos celestes

LA MISIÓN GALILEO

Una de las misiones planetarias más espectaculares jamás concebidas por el hombre nos ha llevado al corazón mismo del sistema de Júpiter. El mayor planeta del sistema solar y sus satélites han desvelado secretos impensables, hasta el punto de que han revolucionado algunas de las ideas sobre la formación de los planetas.



El 17 de diciembre de 1995, Júpiter fue bombardeado por un objeto totalmente extraño: no era ni un meteorito ni un cometa, sino una astronave construida por el hombre, una parte de la cual tenía la misión de penetrar y estudiar las capas más altas de la atmósfera de aquel planeta.

Después de alcanzar una velocidad de unos 50 km/s, la pequeña sonda fue frenada en su descenso por un paracaídas. Luego, durante una hora aproximadamente, aquella plataforma saturada de instrumentos envió a la sonda principal, la Galileo, que giraba alrededor de Júpiter a una distancia de unos 200.000 km, datos sobre la estructura de las nubes que atravesaba y sobre los valores de presión, temperatura y composición de la atmósfera por la que estaba viajando.

Así, después de haber sobrevolado, durante su trayecto de la Tierra a Júpiter, otros dos planetas del sistema solar y dos asteroides, la sonda iniciaba la misión para la que había sido construida.

NACIMIENTO DEL PROYECTO

El proyecto Galileo nació hacia mediados de los años setenta, porque era evidente que Júpiter y sus satélites naturales –que constituyen casi un sistema solar en miniatura– merecían una atención muy especial, y los vuelos de las sondas Pioneer y Voyager no habían sido suficientes para desvelar todos los secretos del mayor planeta de nuestro sistema.

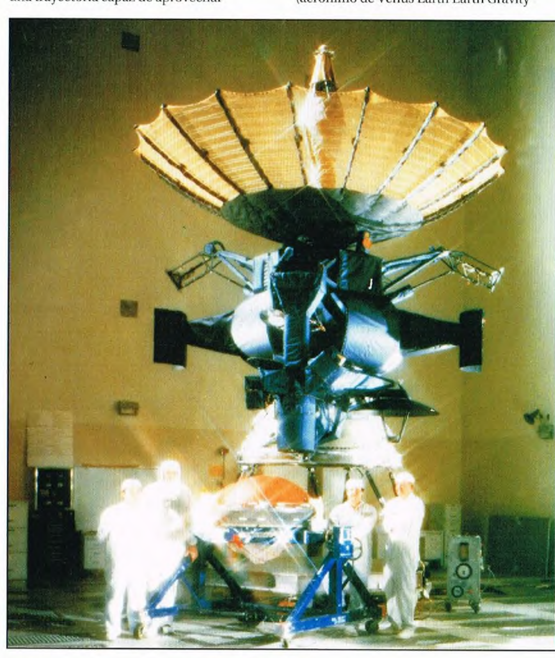
En 1976, un grupo de científicos guiado por James van Allen, de la Universidad de Iowa, presentó a la NASA un proyecto que preveía todo lo que luego pudo hacer la misión Galileo: enviar una sonda al interior de la atmósfera del planeta, girar 11 veces alrededor de Júpiter durante dos años y estudiar de cerca sus principales satélites.

La misión fue aceptada por el Congreso de los Estados Unidos con tal entusiasmo, que fue elegido como el primer proyecto planetario que se enviaría con un transbordador en enero de 1982. Sin embargo, el sistema de propulsión de la sonda tropezó con obstáculos técnicos que sólo con grandes esfuerzos pudieron superarse en 1986.

Cuando todo estaba a punto para el lanzamiento, el incidente del transbordador Challenger, que estalló en pleno vuelo a los pocos segundos de su partida, retrasó todo el programa espacial estadounidense. Sin embargo, este retraso fue beneficioso, porque permitió a los científicos estudiar una trayectoria capaz de aprovechar el efecto honda de Venus y de la Tierra, que debería transferir al vehículo la energía cinética de su movimiento alrededor del Sol, supliendo, de este modo, la inadecuación del propulsor.

La sonda abandonó la Tierra el 18 de octubre de 1989 encerrada en la bodega del transbordador Atlantis. Después de haber sido extraída de la cápsula, la sonda no fue dirigida directamente a Júpiter, sino hacia el centro del sistema solar.

La nueva trayectoria, denominada VEEGA (acrónimo de Venus Earth Earth Gravity



A la derecha, la sonda Galileo en fase de pruebas en tierra, antes de su lanzamiento.

Sensores del magnetómetro

Sección giratoria

Sensor de plasma

Antena de alta ganancia

Detector de partículas cargadas

Sensor de plasma

Generador termoeléctrico por radioisótopos

Instrumento para el estudio del plasma

Detector de polvo

Espectrómetro ultravioleta

Cámara fotográfica

Generador termoeléctrico por radioisótopos

Antena de enlace con la sonda

Radiómetro fotopolarímetro

Espectrómetro para el infrarrojo próximo

Sección no giratoria

Sonda atmosférica

Dibujo con los detalles técnicos de la sonda Galileo.

Assist), preveía, antes de su colocación en la ruta definitiva hacia Júpiter, el paso de la sonda junto a Venus y dos veces cerca de la Tierra.

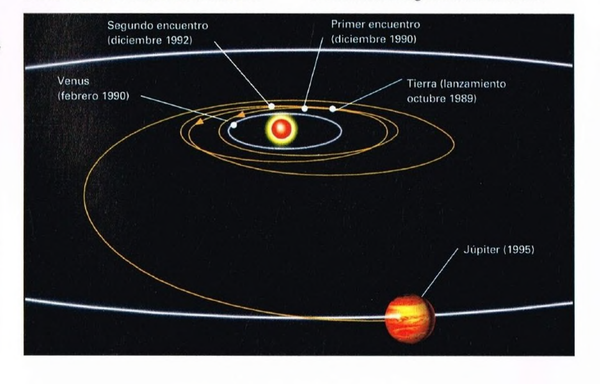
Aparte de los encuentros con los planetas, este tortuoso camino preveía atravesar dos veces el cinturón de asteroides y el acercamiento a dos asteroides que jamás habían sido observados de cerca.

LOS INSTRUMENTOS

En el viaje hacia Venus, así como durante todo su largo crucero, algunos de los instrumentos de la sonda Galileo permanecieron activos para estudiar el espacio interplanetario.

El magnetómetro, por ejemplo, analizó el campo magnético interplanetario y proporcionó datos interesantes sobre el viento solar (flujo de partículas cargadas que, desde el Sol, se propaga hasta distancias enormes).

El espectrómetro para ultravioleta extremo también entró inmediatamente en actividad y dio resultados importantes. Asimismo, los transmisores de radio, utilizados principalmente para las comunicaciones, permitieron efectuar observaciones de gran relieve científico.



A la derecha, la órbita de la sonda Galileo que, antes de llegar a Júpiter, atravesó medio sistema solar.



Arriba, representación pictórica de la sonda con paracaídas, que se desprendió de la Galileo para estudiar el interior del planeta gigante.

Mientras pasaba por el lado opuesto del Sol, la nave Galileo envió ondas radio al Jet Propulsion Laboratory (JPL), de manera que rozaran la superficie del Sol. Analizando los datos recibidos, pudieron detectarse los procesos turbulentos del astro y estudiar el modo en que la materia es expulsada en forma de viento solar por medio de sus efectos producidos sobre las ondas radio.

La sonda Galileo tuvo que cumplir la primera fase de la misión con la antena principal plegada y cubierta por una pantalla que la protegía de los rayos solares. Esta configuración hacía que el instrumento proyectado para transmitir datos a alta velocidad fuera inutilizable.

La sonda también disponía de dos pequeñas antenas, colocadas en cada uno de los extremos, pero no estaban en condiciones de enviar gran cantidad de información a larga distancia. Por tanto, el grabador de cinta de la sonda fue programado para conservar los datos recogidos en Venus durante las horas de su máximo acercamiento.

Las informaciones se transmitieron después a la Tierra mediante una de las dos antenas de baja ganancia, mientras la sonda Galileo retrocedía para realizar su primera cita, en diciembre de 1990.

La aproximación de la sonda garantizaba que las señales se recibirían intensamente, a pesar de la baja potencia de transmisión.

Además, la sonda Galileo tuvo ocasión de observar la Tierra desde el punto de vista de un explorador interplanetario y envió imágenes extraordinarias de nuestro planeta.

Por otra parte, analizó las regiones más externas del campo magnético terrestre y efectuó las primeras observaciones de la cara oculta de la Luna desde la época del programa Apolo.

Estas imágenes revelaron antiguos procesos volcánicos en regiones que no fueron vistas por los astronautas y confirmaron la existencia de una antigua y enorme cavidad de impacto, llamada polo Sur-Aitken, en la cara oculta de nuestro satélite.

No obstante, después del paso de la sonda por las proximidades de la Tierra, se presentó un obstáculo técnico grave. Con la sonda a una distancia suficiente del Sol, el centro de control intentó desplegar la antena principal, pero después de menos de 10 segundos, se bloquearon algunos motores.

El análisis siguiente indicó que, probablemente, tres de los extensores de la antena no se habían abierto, con lo que el dispositivo quedó reducido a una bola inútil. Todos los esfuerzos que se han hecho hasta ahora para abrir la antena no han dado resultado. El diagnóstico técnico es que los extensores se han bloqueado de manera irremediable, probablemente a causa de la pérdida de lubrificante ocurrida durante los largos viajes que la sonda efectuó, primero desde la costa del Pacífico a la del Atlántico en 1986, luego en sentido contrario cuando el lanzamiento fue aplazado y, finalmente, de nuevo hasta cabo Cañaveral en 1989.

Durante varios meses, el grupo responsable de la misión pensó que casi todo se había perdido.

Los datos del módulo de descenso del pequeño satélite podían ser enviados a la Tierra mediante la pequeña antena utilizada para las comunicaciones, pero todo cuanto hubiera podido revelar la sonda propiamente dicha tenía que pasar forzosamente por la antena principal, proyectada para transmitir 134 kbits de información por segundo.

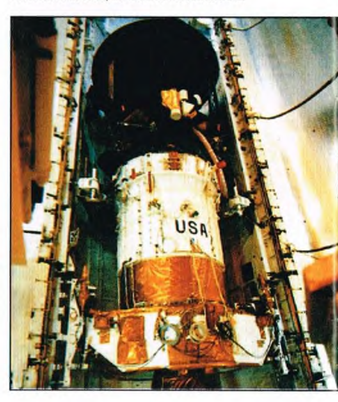
Pero después de una serie de reuniones frenéticas, se llegó al convencimiento de que muchas de las observaciones programadas también podían hacerse aprovechando la antena más pequeña, a pesar de su velocidad de transmisión –de sólo 10 bits por segundo– desde la distancia de Júpiter.

Y así se hizo, aunque la preocupación más inmediata era la cita inminente con Gaspra, que debía ser el primer encuentro de una sonda espacial con un asteroide.

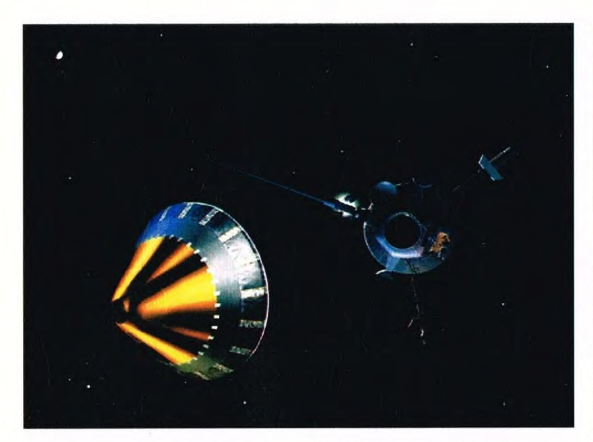
EL ENCUENTRO CON GASPRA

Los preparativos para la observación de Gaspra estaban muy avanzados y se basaban en gran parte en comunicaciones rápidas a través de la antena principal, tanto para llevar la sonda Galileo a las proximidades del asteroide como para enviar informaciones a la Tierra.

Muy pronto se pensó en un sistema de sustitución. Para definir el punto en que se hallaba la sonda, se habría necesitado el



La sonda Galileo y el cohete lanzador IUS son colocados en la bodega del transbordador Atlantis que los llevará al espacio.



EN TORNO A JÚPITER

El desplazamiento de la sonda Galileo alrededor de Júpiter se programó para que cumpliera 11 órbitas, cada una de las cuales, excepto una, incluía un sobrevuelo próximo a Ganimedes, Calisto y Europa durante los pasos más cercanos al planeta. El punto más alejado de la órbita varía entre los 5 y los 20 millones de kilómetros del planeta.

envío inmediato a la Tierra de 20 fotografías del firmamento, a fin de identificar puntos de referencia precisos. Pero se halló el modo de utilizar solamente 5. La exactitud requerida se obtuvo gracias a la colaboración de los astrónomos de todo el mundo, que intentaron calcular con el máximo detalle la órbita de Gaspra.

El grabador de a bordo, que había almacenado las informaciones sobre Venus, se utilizó de nuevo para el mismo fin. Cuando la sonda pasó cerca de la Tierra, descargó la cantidad de datos recogidos y no se perdió ninguna información.

En cambio, al pasar por las proximidades de Ida, ya no estaba en condiciones de recoger las informaciones en su grabador, porque entonces la sonda ya no volvería a pasar cerca de la Tierra y, por tanto, los datos recogidos debían enviarse directamente a la base terrestre a sólo 40 bits por segundo, velocidad que no habría sido suficiente para transmitir todas las informaciones.

Sin embargo, se halló el modo para que enviara sólo los datos importantes (por ejemplo, el cielo negro se excluía de las informaciones) y así se alcanzó también este objetivo.

Un hecho excepcional para la sonda fue la posibilidad de observar el espectáculo de la caída del cometa Shoemaker-Levy en la cara nocturna de Júpiter, ocurrida en julio de 1994. También en este caso se recurrió a técnicas de selección para enviar a la Tierra sólo las imágenes más interesantes.

En agosto de 1995, la sonda Galileo se vio sometida a la tormenta más intensa de polvo jamás registrada. Partículas que se movían a una velocidad comprendida entre

Arriba, dibujo que representa la Galileo cuando, en las proximidades de Júpiter, desprende la sonda que se introducirá en el planeta.

40 y 200 km/s bombardearon la sonda durante más de un mes al ritmo de unas 20.000 partículas por día.

Afortunadamente, los granos de polvo eran demasiado pequeños para dañar la sonda y, de este modo, la Galileo salió indemne también de esta aventura.

Luego, el 13 de julio de 1995, la pequeña sonda unida a la Galileo se separó para iniciar la trayectoria que la dirigiría a la atmósfera de Júpiter.

Así, después de seis años de viaje a través del sistema solar y después de haber alcanzado una velocidad de 170.700 km/h a causa de la tremenda fuerza gravitatoria de Júpiter, que es 230 veces superior a la terrestre, el pequeño satélite de la sonda Galileo penetró en la atmósfera del planeta el 7 de diciembre de 1995, tal como se había previsto en los planes del proyecto. Durante los dos primeros minutos del que, sin duda, fue el encuentro más difícil con una atmósfera planetaria, el pequeño satélite de la sonda Galileo tuvo que soportar temperaturas similares a las de la superficie del Sol.

Para la marcha de aproximación a Júpiter, el equipo de proyectistas había pensado en un sistema de recepción de los datos recogidos que aprovechara todas las posibilidades del ordenador de a bordo de la sonda, de manera que las informaciones se comprimieran y pudieran enviarse a la Tierra utilizando únicamente la pequeña antena de que disponía la sonda, además, naturalmente, de hacer el mejor uso posible de los aparatos receptores en tierra.

Los resultados obtenidos han proporcionado una nueva imagen de Júpiter y sus satélites, y han revolucionado algunas de las ideas que tenían los científicos sobre nuestro sistema solar.

Imagen de la pequeña sonda que se desprendió de la Galileo, sobre las nubes de Júpiter.



UN OJO EN EL CIELO PARA CONOCER EL TIEMPO

La posibilidad de observar desde lo alto la evolución de las nubes, de la humedad, de la temperatura y de todos los parámetros físicos del aire ha proporcionado a los meteorólogos el mejor medio para prever la evolución del tiempo. Hoy, una flota de satélites permite tener constantemente un cuadro de todos los parámetros físicos que caracterizan nuestra atmósfera.



El inicio de la era espacial hizo pensar inmediatamente que, al igual que en las telecomunicaciones, los satélites serían de una gran ayuda para la meteorología.

Los primeros resultados de los cohetes sonda habían demostrado la importancia que tenía examinar con instrumentos adecuados la atmósfera terrestre, mientras que la posibilidad de incorporar a bordo de los satélites máquinas fotográficas y otros sensores hizo pensar muy pronto a los meteorólogos que de ellos sería posible obtener, de manera continua, informaciones sobre las variables condiciones meteorológicas de la Tierra.

LOS TIROS

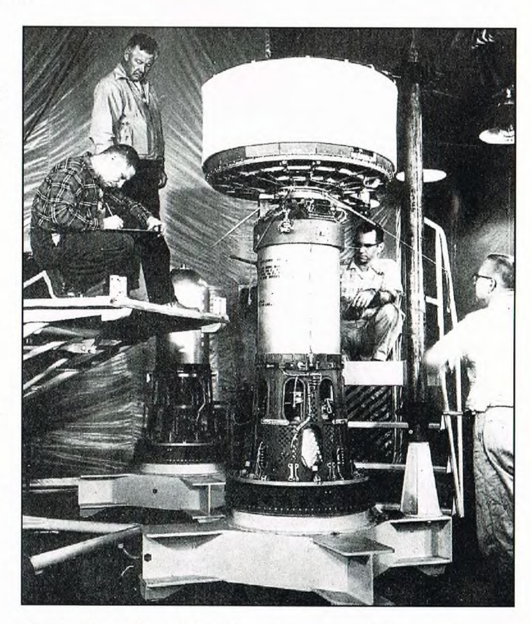
La aprobación a este tipo de aplicación del uso de los satélites fue dado por Estados Unidos, con un grupo de satélites a los que se les dio el nombre de TIROS (acrónimo de Television and Infrared Observation Satellite).

Tiros-1, enviado al espacio en abril de 1960, demostró la posibilidad efectiva de utilizar los satélites para efectuar observaciones meteorológicas desde el espacio. La evolución del sistema condujo rápidamente a un programa de satélites semioperativos, en cuyo marco fueron lanzados con éxito otros nueve satélites en el período comprendido entre 1960 y 1965. Todos los satélites llevaban a bordo un par de telecámaras en miniatura y, en algunos de ellos, también había un radiómetro de barrido en el infrarrojo y un sistema que controlaba la radiación emitida por la Tierra.

En algunas misiones se experimentaron aparatos que más tarde se convertirían en otros satélites de serie, como el sistema ATP (Automatic Picture Transmission), que transmitía automáticamente las imágenes captadas a las estaciones terrestres distribuidas por los continentes.

El deseo de efectuar regularmente en todo el mundo observaciones diarias, sin interrupciones de la transmisión de los datos, se consiguió con la introducción del TOS (Tiros Operational System) en febrero de 1966. Este sistema utilizaba un par de satélites ESSA (Environmental Science Service Administration), cada uno de los cuales estaba configurado para llevar a cabo una misión muy precisa.

Un satélite enviaba a la Tierra, a las estaciones del Departamento de Comercio de Wallops Island, Virginia, y de Fairbanks, Alaska, conectadas con el NESS (National Environmental Satellite Service) de Suitland, Maryland, los datos sobre las condiciones meteorológicas para que fuesen procesados y enviados a los mayores centros de previsión meteorológica de Estados Unidos y de otros países.



Arriba, últimas comprobaciones del satélite meteorológico estadounidense Tiros-1 antes de su lanzamiento. Tenía la forma de un cilindro de 107 cm de altura y 56 cm de diámetro, y pesaba 128 kilogramos.

Con el sistema ATP, otro satélite suministraba en tiempo real las imágenes captadas por sus telecámaras y así sucesivamente. Entre 1966 y 1969 fueron lanzados con éxito nueve satélites ESSA y uno de ellos, el ESSA-8, permaneció activo hasta marzo de 1976.

LOS ITOS

Una nueva generación de satélites meteorológicos obtuvo el visado para el espacio con el inicio del segundo decenio de la era de satélites de este tipo, y el primer lanzamiento se efectuó el 23 de enero de 1970, con el ITOS-1.

Este satélite se acercaba notablemente a los objetivos del US National Operational Meteorological System. El ITOS-1 tenía incorporadas las capacidades de los dos satélites ESSA, es decir, la transmisión automática de las imágenes con posibilidad de lectura directa y registro de imágenes globales que debían transmitirse y procesarse posteriormente.

El satélite también efectuaba observaciones globales de la cobertura nubosa de la Tierra cada 12 horas, mientras los dos satélites ESSA proporcionaban el mismo servicio sólo cada 24 horas. Un segundo satélite ITOS, conocido como NOAA-1, el nombre del organismo que lo gestionaba (National Oceanic and Atmospheric Administration), fue lanzado el 11 de diciembre de 1970. La evolución del sistema ITOS condujo al ITOS-D, que llevaba a bordo un aparato más sofisticado de sensores atmosféricos. Sus instrumentos proporcionaban imágenes diurnas y nocturnas mediante radiómetros de elevadísima resolución (VHRR) y radiómetros de barrido de resolución media (SR). También tenía incluidos radiómetros que determinaban el perfil vertical de las temperaturas de la atmósfera (VTPR) y un instrumento para el control de protones solares (SPR), es decir, que medía el flujo de protones y electrones procedentes del espacio.

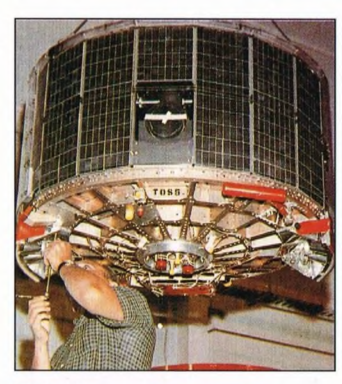
Para la serie ITOS-D se proyectaron seis satélites (ITOS-D, E-2, F, G, H e I) y después el NOAA-2 (ITOS-D).

Otros tres satélites de este tipo (NOAA-3, NOAA-4 y NOAA-5) fueron puestos en órbita en 1973, 1974 y 1976, respectivamente.

Una tercera generación de satélites meteorológicos operativos estadounidenses, situados en órbita polar, completaba el proceso de desarrollo y comprendía otros satélites TIROS-N, así como el último satélite de la serie, el NOAA-14, que fue lanzado al espacio en 1995.

A bordo de este último hay, entre otros instrumentos, un radiómetro de alta resolución AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), que permite detectar con precisión la temperatura de los océanos, el índice de cobertura de la vegetación y los perfiles de temperatura y humedad de la atmósfera. Unos instrumentos pueden detectar la radiación emitida por la Tierra y, además, otros pueden procesar los datos de las observaciones y transferir los resultados a la Tierra.

Estos satélites trabajan siempre en órbitas casi polares, circulan a 820 km de altura y completan una revolución alrededor de la Tierra en sólo 120 minutos, volviendo a pasar por la misma zona cada 12 horas.



A la izquierda, una fase de preparación del satélite ESSA-3, de la serie TOS. Este satélite fue el primero en llevar a bordo dos telecámaras que podían suministrar diariamente un cuadro completo de la situación meteorológica terrestre.

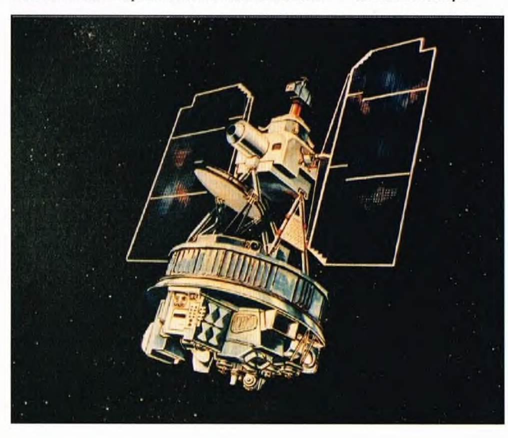
LOS ATS

A mitad de los años sesenta, el aumento de potencia de los cohetes lanzadores ofreció la posibilidad de poner satélites en órbita geoestacionaria a unos 35.880 km por encima del ecuador. La NASA proyectó un programa de investigación basado en satélites de órbita geoestacionaria con la serie de los ATS (Applications Technology Satellite).

Aunque inicialmente se concibieron como bancos de prueba de nuevas tecnologías destinadas a los satélites de telecomunicaciones, los satélites de la serie ATS llevaban a bordo telecámaras de alta resolución para la observación de la atmósfera.

El 7 de diciembre de 1966 fue puesto en órbita geoestacionaria el ATS-1, que se había diseñado para proporcionar una fotografía del hemisferio occidental cada 20 minutos. La posibilidad de recibir secuencias

Abajo, imagen pictórica de un satélite meteorológico de la serie Nimbus. Entre 1964 y 1978 se pusieron en órbita siete satélites de este tipo.



NUEVOS PROGRAMAS

Al mismo tiempo que los primeros satélites meteorológicos dieron sus frutos, a pesar de la sencillez de los medios utilizados, los científicos estadounidenses desarrollaron otros programas con el fin de recoger informaciones más detalladas sobre la atmósfera terrestre para poder hacer previsiones meteorológicas cada vez más precisas. Así nacieron algunos proyectos de investigación, como los ATS y los Nimbus.

de fotografías de la misma región mejoraba la capacidad de descubrir tempestades y huracanes, y proporcionaba en tiempo real la cobertura de las nubes y de los movimientos de los frentes tormentosos.

Con el ATS-3, que fue lanzado en noviembre de 1967, se obtuvieron las primeras fotografías en color de todo el globo terrestre, que se han utilizado en muchos campos diferentes de la meteorología.

LOS NIMBUS

Los satélites de esta serie tenían numerosas tareas:

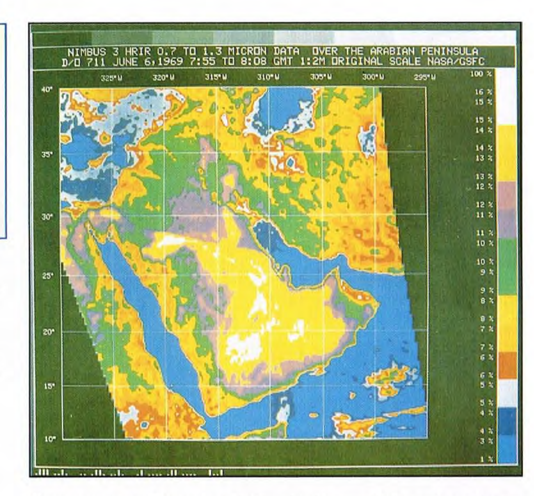
- desarrollar sensores radiométricos y espectrométricos pasivos para la vigilancia diaria a escala mundial de la atmósfera de la Tierra y, por tanto, crear un banco de datos para previsiones meteorológicas a largo plazo;
- desarrollar y evaluar nuevos sensores activos y pasivos para analizar la atmósfera de la Tierra y trazar mapas de las características de su superficie;
- desarrollar tecnologías espaciales y técnicas para el tratamiento de los datos de nuevo tipo, que puedan utilizarse por satélites meteorológicos y otros satélites para teledetección;
- desarrollar nuevas técnicas para la exploración de la atmósfera de otros planetas;
- participar en programas de observación meteorológica diaria global;
- proporcionar una fuente suplementaria de datos meteorológicos operativos.

Entre 1964 y 1978 se pusieron en órbita siete satélites, el último de los cuales, el Nimbus-7, llevaba a bordo una serie de instrumentos para el control del nivel de contaminación atmosférica.

LA SERIE SMS/GOES

El éxito del programa experimental de observaciones atmosféricas en órbita geoestacionaria estimuló a la NASA a desarrollar un satélite operativo diseñado precisamente para este objetivo. El prototipo de la serie SMS/GOES (Synchronous Meteorological Satellite/Geostationary Operational Environmental Satellite) fue llamado SMS-1. Lanzado con éxito en mayo de 1974 desde un lugar del ecuador a 45° de longitud O, proporcionaba una cobertura continua de una tercera parte de la Tierra.

El principal instrumento a bordo del SMS era un radiómetro de barrido en el visible y en el infrarrojo. Llamado VISSR (Visible Infrared Spin Scan Radiometer), este sensor permitía observaciones



diurnas y nocturnas de las nubes y la determinación de las temperaturas, de la velocidad de los vientos y de la altura de las nubes.

Los SMS también retransmitían a la Tierra los datos que recibía de aparatos de detección situados lejos de zonas habitadas, como los instalados en hidrómetros fluviales, boyas oceánicas, barcos y aviones.

La parte de su instrumentación destinada al control de algunos parámetros X del espacio extraterrestre tenía la misión de detectar actividades solares insólitas, como las erupciones, y debía medir el flujo de protones y electrones, y las variaciones del campo magnético terrestre. Sobre una base operativa fue posible la observación y la previsión de fenómenos atmosféricos que no atañen a la meteorología.

Arriba, una fotografía en infrarrojo de la península Arábiga tomada desde el satélite Nimbus-3. Las zonas claras son áreas arenosas, mientras que las rojas indican áreas de vegetación.



A la izquierda, el cuerpo cilíndrico del satélite meteorológico SMS (Synchronous Meteorological Satellite). Posicionado en órbita geoestacionaria sobre Alaska, este satélite puede observar los Estados Unidos occidentales.



EN EL PRÓXIMO NÚMERO

EL SISTEMA SOLAR

LA CAÍDA DEL SHOEMAKER-LEVY 9

ESTRELLAS Y GALAXIAS

EL FUTURO DEL UNIVERSO

GUÍA DE LAS CONSTELACIONES

ASTRONOMÍA Y ASTROLOGÍA

CÓMO FUNCIONA EL UNIVERSO

LAS LEYES DE LA ÓPTICA

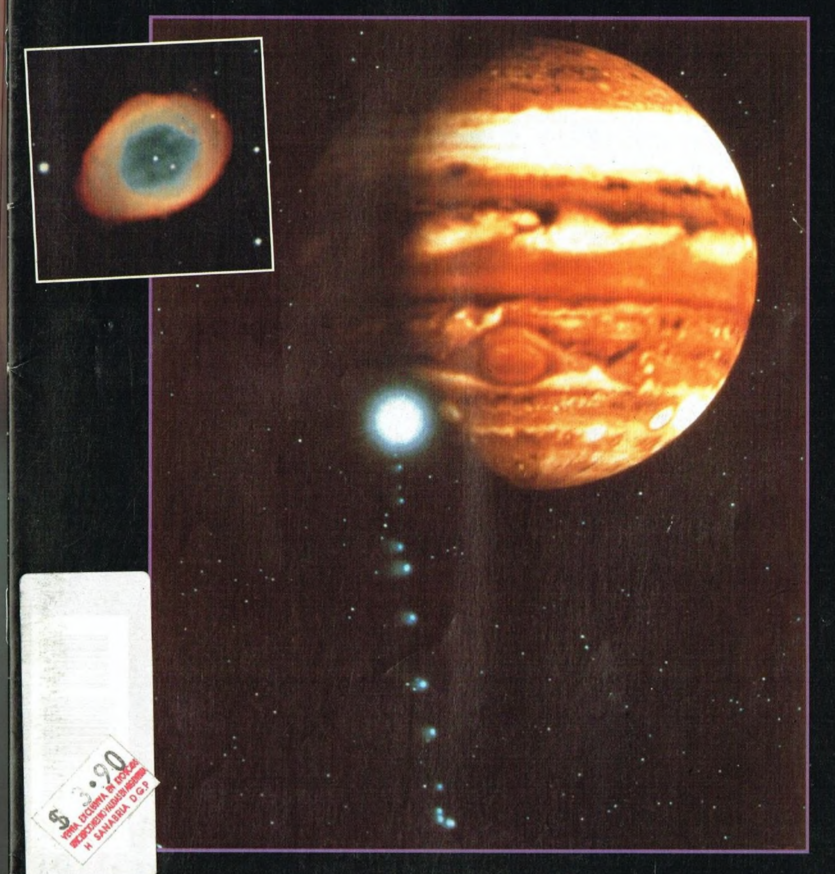
LA EXPLORACIÓN DEL ESPACIO

CÓMO LLEGAR A SER ASTRONAUTA

EL UNIVERSO

ENCICLOPEDIA DE LA ASTRONOMÍA Y EL ESPACIO

32



PLANETA DeAGOSTINI



COMPOSICIÓN DE LA OBRA

Volumen 1	Fascículos 1	al	16
Volumen 2	Fascículos 17	al	32
Volumen 3	Fascículos 33	al	48
Volumen 4	Fascículos 49	al	64
Volumen 5	Fascículos 65	al	80

VENTA EN QUIOSCOS

Pida a su proveedor habitual que le reserve un ejemplar de EL UNIVERSO. Adquiriéndolo todas las semanas en el mismo punto de venta facilitará la distribución y obtendrá un mejor servicio.
Las tapas correspondientes a cada volumen se ponen a la venta con el fascículo que cierra el tomo. Con dicho fascículo se entregan las portadillas correspondientes.

Presidente: José Manuel Lara
Director General: Carlos Fernández
Director Editorial: Virgilio Ortega
Director General de Producción: Félix García
Coordinador General: Carles Dorico

© Editorial Planeta Argentina S.A.I.C.
Av. Independencia, 1668 - Capital Federal
Servicio de atención al cliente: Tel. (01) 482 - 0655 y 482 - 0657
Distribuye: Capital: Huesca-Sanabria,
Baigorri, 103, Capital Federal,
Interior: D.G.P., Alvarado, 2118, Capital Federal

© Editorial Planeta Mexicana, S.A. de C.V.
Av. Insurgentes Sur # 1162 - México D.F.
Servicio de atención al cliente: Tel. 575 13 48

© Editorial Planeta Colombiana, S.A.
Carrera, 68, n.º 25-55 - Santa Fé de Bogotá, D.C.
Servicio de atención al cliente: Tel. 9800 - 15315

© Editorial Planeta Chilena, S.A.I.C.
Olivares, 1229 - Santiago de Chile

ISBN Obra completa (con vídeo): 84-395-4148-1
Obra completa (sin vídeo): 84-395-4138-4
Fascículos (con vídeo): 84-395-4149-X
Fascículos (sin vídeo): 84-395-4139-2
Depósito legal: B-47.097-1997

Impresión: Cayfosa, Santa Perpètua de Mogoda, Barcelona
Impreso en España - Printed in Spain - Mayo 1998

Los editores se reservan el derecho de modificar el precio de venta de los componentes de la colección en el transcurso de la misma, si las circunstancias así lo exigieran.
Los editores garantizan la publicación de todos los fascículos que componen esta obra.

Fotografías: Lee Gibbons: cubierta, 116-117, 116ab., 117ar.; ESA/SPL: 107c.der.; E.T. Archive: 106ar.; Galaxy Picture Library: 101, 104, tercera de cubiertas; IGDA: 107ar.der.; Science Photo Library/Julian Baum: 106-107; Dr. Jeremy Burgess: 103 der.; Range: 111; Hugh Rowland: 110; Spectrum: 110, 111; US Naval Observatory: 112ar.izq.; Bristock-IFA: 114-115; BNSC/ESA: 118ab.; ESA: 118-119, 119ab., 120c.; Tony Stone Picture Library: 120ab.
Dibujos: Robin Carter/WLAA: 104-105, 117ab.; David A. Hardy: 102-103; Hugh Rowland: 105, 106ab., 120; Katz: 108-109; Sandra Russell/Black Hat: 112ar.; Julian Baum: 113; Farroxs: 116ar.; Robin Bottel: 115ab.; Spectrum Picture Library: 114ab.

PETICIÓN DE FASCÍCULOS ATRASADOS

Válido sólo para el territorio español y para no suscriptores.

Si desea recibir algún fascículo atrasado o tapas, rellene en LETRAS MAYÚSCULAS este boletín y envíelo a:
PLANETA-DeAGOSTINI, Apartado de Correos N.º 2.867 - 08080 Barcelona, o llame al Tel. **902 288 288***

DATOS PERSONALES:

APELLIDOS

NOMBRE

CALLE O PLAZA

N.º PISO PUERTA ESC.

CÓDIGO POSTAL POBLACIÓN

PROVINCIA EDAD

TELÉFONO PROFESIÓN

FIRMA (Imprescindible)

• Recibirá contrarreembolso, más gastos de envío todo el material que nos haya solicitado.

SOLICITUD:

EL UNIVERSO
ENCICLOPEDIA DE LA ASTRONOMÍA Y EL ESPACIO

Indique los números de los fascículos atrasados que desea recibir:

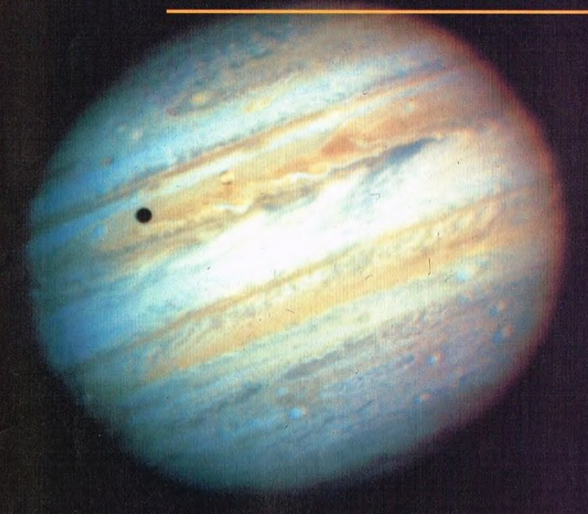
N.º de tapas que solicita:

Indique si desea recibir la versión con vídeo o sin vídeo:

Con vídeo ☐ Sin vídeo ☐

• Planeta-DeAgostini mantendrá su servicio de petición de atrasados hasta un plazo máximo de 18 meses a partir de la fecha de venta de cada uno de los números que forman la colección.

LA CAÍDA DEL SHOEMAKER-LEVY 9



En julio de 1994, el cometa Shoemaker-Levy 9, después de haberse fragmentado, cayó sobre el planeta Júpiter. Este violento encuentro espacial, único en su género, fue seguido en directo por los astrónomos de todo el mundo.

La noche del 22 de marzo de 1993, Carolyn Shoemaker y David Levy estaban analizando las imágenes tomadas la noche anterior con el telescopio Schmidt de 122 cm del observatorio de Monte Palomar, cuando descubrieron la presencia de un cometa muy próximo al planeta Júpiter. Podía tratarse de un descubrimiento como tantos otros (cada año se descubren nuevos cometas), pero una vez conocida la trayectoria del objeto, se vio que estaba en órbita alrededor de Júpiter y no del Sol, como ocurre generalmente. Además, las primeras imágenes mostraron que su núcleo estaba despedazado en una serie de fragmentos que, dispuestos en fila uno tras otro, formaban una especie de tren. Como suele ser costumbre, el nuevo cometa tomó el nombre de sus descubridores y se denominó Shoemaker-Levy 9.

LA CAPTURA

Reconstruyendo retrospectivamente en el tiempo el recorrido del cometa, los astrónomos se dieron cuenta de que había pasado a sólo 90.000 km del centro del planeta gigante entre el 7 y el 8 de julio de 1992, es decir, unos ocho meses antes de su descubrimiento. Fue en aquella ocasión cuando la gravedad de Júpiter lo capturó y le obligó a recorrer una órbita elíptica, marcadamente excéntrica, de unos 50 millones de km. Sin embargo, aquel

En la imagen, los fragmentos del cometa Shoemaker-Levy 9, alineados en fila, antes de caer sobre Júpiter.

acercamiento había provocado otro efecto mucho más destructivo: la fuerza de atracción gravitatoria de Júpiter, que es el planeta más masivo del sistema solar, había actuado con violencia sobre el núcleo del cometa, fragmentándolo al menos en unos 20 pedazos. Los acontecimientos de este tipo, aunque raros, no son excepcionales. En efecto, se conocían ya 21 casos análogos durante el período comprendido entre 1846 y 1976. Normalmente es el Sol el que produce estos efectos destructivos (como en el caso del cometa West en 1976); en raras ocasiones la causa es Júpiter, como ocurrió con el cometa Brooks 2 en 1886.

LA PREVISIÓN DEL ENCUENTRO

El 14 de julio de 1993, el cometa pasó por el punto de su órbita más alejado de Júpiter, llamado apojúpiter, y, mientras tanto, su recorrido pasado y futuro pudo ser determinado con mayor exactitud. Se apuntó la posibilidad de que ya estaba en órbita de Júpiter desde hacía bastante tiempo (quizá 20 años), pero lo más interesante fue la previsión de que caería sobre el planeta gigante en verano de 1994. Los observatorios y los instrumentos de todo el mundo fueron alertados para que siguieran, día tras día, la aproximación y la ocurrencia del encuentro. El Shoemaker-Levy 9 se observaba con telescopios en tierra, con el telescopio espacial y, para tener la posibilidad de observarlo desde diversos ángulos, también con algunas sondas que en aquel momento se encontraban viajando por el sistema solar hacia varios objetivos: la Galileo, la Ulises y, además, la Voyager 2, todavía en funcionamiento después de casi 20 años de misión hacia los planetas exteriores.

Abajo, en las tres imágenes, tomadas con una diferencia de algunos meses, puede verse la evolución en el tiempo de los fragmentos más brillantes del Shoemaker-Levy 9.

Arriba, imagen de las antenas del radiotelescopio de Medicina, cerca de Bolonia. Esta institución colaboró activamente en la campaña de observación del Shoemaker-Levy 9.

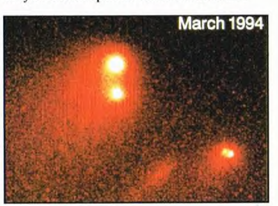
El tamaño del núcleo original del cometa, antes de su fragmentación, se estimó en unos 10 km, mientras que para los diversos fragmentos se calculó un tamaño del orden de 2 a 4 kilómetros.

¡PREPARADOS PARA EL IMPACTO!

A medida que se aproximaba el impacto, los astrónomos se dieron cuenta de que el encuentro no se produciría en condiciones muy favorables para la observación desde







la Tierra. En efecto, los primeros fragmentos caerían sobre el hemisferio de Júpiter que, en el momento de la colisión, no sería visible desde nuestro planeta. Sólo después de algún tiempo, con la rotación del gigante gaseoso alrededor de su propio eje, sería posible ver las huellas del encuentro.

UN EFECTO DE MAREA

El núcleo del cometa Shoemaker-Levy 9 se disgregó a causa de la poderosa atracción gravitatoria de Júpiter. Se trata de un efecto de marea que se produce cuando la atracción gravitatoria que un cuerpo sufre por parte de otro no es uniforme en todos sus puntos. La pequeña distancia entre el planeta y el cometa en el momento de acercamiento máximo hizo que la parte del núcleo más próxima a Júpiter sufriera una atracción más fuerte que la más alejada, provocando una especie de «estiramiento» cuyo resultado fue la fragmentación del núcleo. Los más de 20 fragmentos, que siguieron la misma órbita, se distribuyeron en una cadena que, en el momento de su descubrimiento, tenía 158.000 km de longitud y en el cielo cubrían un ángulo de 49" de arco.

Arriba, fotografía de aficionado del Shoemaker-Levy 9, que fue tomada siguiendo el núcleo del planeta, lo que provocó que las estrellas dejaran estas huellas alargadas.

El primer fragmento impactó sobre Júpiter la tarde del 16 de julio de 1994. Como se ha dicho, el acontecimiento no fue visible inmediatamente desde la Tierra. Pero, entretanto, los instrumentos de infrarrojos que seguían el fenómeno detectaron una emisión de luz precisamente en el borde del planeta, cerca del punto de impacto. Poco después, también los telescopios ópticos empezaron a trabajar y observaron una mancha oscura muy definida en el punto donde había caído el fragmento.

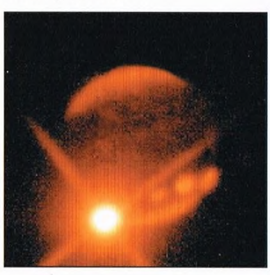
Júpiter es un planeta gaseoso y, por tanto, la caída de un cuerpo sobre él no produce los mismos efectos que sobre la Tierra o la Luna, que tienen una superficie sólida en la cual se puede producir una auténtica colisión, con la eventual formación de un cráter. El impacto con Júpiter se parece más bien a la caída de una piedra en el agua. La piedra se hunde y forma ondas que se propagan concéntricamente alrededor del punto de impacto.

UNA LLUVIA DE FRAGMENTOS

El segundo fragmento, llamado B, cayó al alba del día 17, seguido a pocas horas de distancia del fragmento C y, en los días siguientes, de todos los demás, hasta el último –el vigésimo primero– el 22 de julio.

Los efectos sobre Júpiter de esta serie de caídas fueron considerables. Aunque se trata de un planeta masivo, capaz de absorber choques muy violentos, la energía liberada

Abajo, fotografía del impacto del fragmento K sobre Júpiter. A la derecha se ven las señales de tres impactos anteriores.



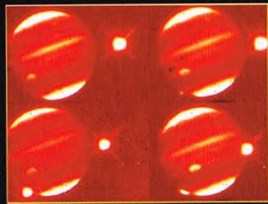


Imagen infrarroja de algunos impactos. A la izquierda del disco pueden verse las señales de la caída anterior de algunos fragmentos.

por los impactos fue enorme, equivalente a 100 millones de megatones (¡casi un billón de veces superior a la bomba atómica de Hiroshima!). Esta gran energía se debía a la gran velocidad de los fragmentos, del orden de 60 kilómetros por segundo.

Después de analizar los primeros datos, se empezó a interpretar lo que los instrumentos habían visto. Los pedazos del Shoemaker-Levy 9 probablemente consiguieron penetrar muchos kilómetros en el interior de la atmósfera de Júpiter. Con el impacto, calentaron el gas del planeta y lo proyectaron hacia el exterior en penachos de más de 3.000 km de altura que, al enfriarse, produjeron los fulgores infrarrojos que se observaron. Cuando el calor se dispersaba y el resplandor se amortiguaba, quedaba una especie de «cicatriz» oscura en el punto donde había caído el fragmento. Estas señales eran perfectamente visibles en las fotografías hechas tanto con los instrumentos en tierra como con el telescopio espacial. La mancha correspondiente al impacto G tenía unos 15.000-20.000 km de diámetro.

Sin embargo, antes de los impactos propiamente dichos, se vieron dos fulgores luminosos –registrados por la sonda Galileo, que se encontraba en una posición idónea para observarlos– al otro lado del planeta respecto a la Tierra. Se piensa que se produjeron a consecuencia de la entrada de los fragmentos en la atmósfera de Júpiter, algo así como lo que sucede en la Tierra cuando vemos caer estrellas fugaces. Después de la caída del fragmento G, uno de los de mayores dimensiones, el fulgor emitido en el infrarrojo fue mayor que la luminosidad de todo el planeta.

Sigue siendo un gran misterio el origen de las grandes manchas oscuras, que quedaron en los lugares de los impactos por un período de tiempo bastante largo, hasta que fueron borrándose. Probablemente, una parte de ellas era polvo de los núcleos del cometa esparcido en la atmósfera de Júpiter. El azufre detectado en las «cicatrices» parece pertenecer todo, o casi todo, al planeta, ya que la observación ha mostrado una cantidad tan grande de este elemento que su procedencia de un objeto pequeño como es el núcleo de un cometa es imposible.

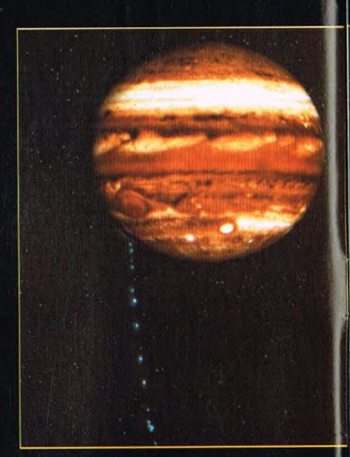
INFORMACIONES DEL INTERIOR

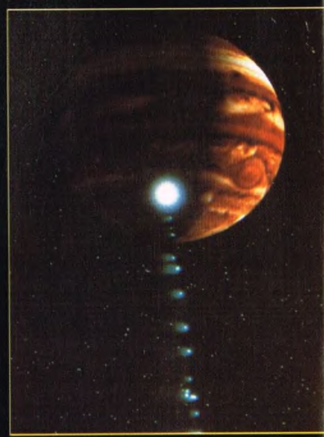
Después de los impactos de los fragmentos, los instrumentos registraron la presencia en el lugar de muchas sustancias químicas, entre ellas, metano, amoníaco, óxido de carbono, agua, ácido sulfhídrico y otros compuestos de azufre, etileno, ácido cianhídrico, etc. Hubo que preguntarse si estas sustancias provenían del cometa o del interior de Júpiter.

Es especialmente interesante el caso del agua, cuyas rayas espectrales se vieron durante una hora después de los impactos; luego desaparecieron. Como el agua es uno de los componentes fundamentales de los núcleos de los cometas, es razonable pensar que su procedencia era ésta. Por otra parte, a la altísima temperatura alcanzada en la caída, las moléculas del agua deberían haberse descompuesto, por lo que el agua no podría haber sido visible. Quizá Júpiter también posee reservas de agua ocultas en un estrato que se extiende unos 50 km por debajo de la parte más alta de sus nubes. En tal caso, su ascensión a la superficie se debería a la mezcla que se produjo cuando los fragmentos del cometa penetraron en la atmósfera de Júpiter. En cambio, observaciones en la región radio del espectro electromagnético, obtenidas con el radiotelescopio de Medicina, cerca de Bolonia, parecen avalar la hipótesis que atribuye al cometa el origen del agua observada, la cual habría conseguido sobrevivir incluso a la violencia de los impactos.

Abajo, fotografía en infrarrojo del impacto del fragmento Q, tomada desde el observatorio de Cala Alto (España).

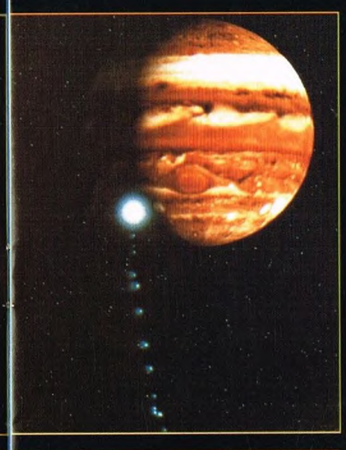






LA VIDA DE LOS COMETAS

Dado que, según se ha dicho, el agua es uno de los componentes principales del núcleo de los cometas, y que la Tierra, cuando se formó hace más de 4.000 millones de años, estuvo sometida a un intenso bombardeo de cuerpos de este tipo, es bastante plausible la posibilidad





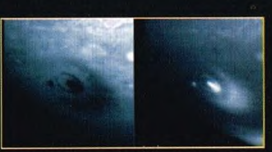
Arriba, reconstrucción de las últimas fases de aproximación a Júpiter de los fragmentos del cometa y de los primeros impactos.

de que los cometas hubieran tenido un papel importante en el desarrollo de la vida. El agua y los compuestos del carbono, que entonces no existían en nuestro planeta y que son indispensables para el desarrollo de la vida, podrían haber llegado del espacio como una especie de «inseminación» cósmica.

ANTIGUOS Y AISLADOS

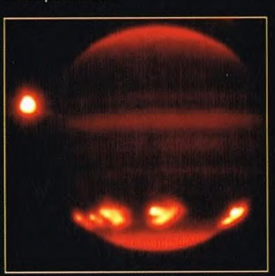
Los cometas son, con los meteoritos, los cuerpos más antiguos del sistema solar. Su existencia aislada los ha preservado de contaminaciones recientes, lo que les ha permitido conservar su composición originaria. Por eso, su estudio es importantísimo para comprender cómo se formó nuestro sistema planetario. Acontecimientos excepcionales, como la caída del Shoemaker-Levy 9 sobre Júpiter, permiten mejorar nuestro conocimiento en este campo.

La caída del Shoemaker-Levy 9 sobre Júpiter permitió a los científicos hacer estudios sobre los cometas y sobre la constitución interna del mayor planeta del sistema solar, que, de otro modo, no hubieran sido posibles. No obstante, como suele ocurrir cuando se abren de repente grandes perspectivas en un nuevo campo, después de tres años, son todavía muchos los misterios que no se han resuelto. Son numerosas las observaciones que han dado resultados contradictorios y su interpretación requerirá mucho tiempo. Sin duda, una gran ayuda procederá de las informaciones enviadas a la Tierra por la Galileo, que llegó a Júpiter y liberó dentro de su atmósfera una pequeña sonda, la cual, después de penetrar en las nubes, transmitió datos hasta que quedó destruida por la enorme presión de los gases. Una mayor comprensión de lo que sucede en el interior del planeta gigante también permitirá interpretar mejor lo que ocurrió en la colisión con el Shoemaker-Levy 9, hasta que sea posible, como ya está en proyecto, el acercamiento a otro cometa para saber más sobre el origen del sistema solar y, también, sobre el origen de la vida.



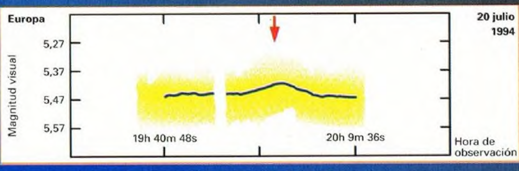
Imágenes de la zona donde impactó el fragmento G. A la izquierda, fotografía en luz verde; a la derecha, en la longitud de onda del metano.

Abajo, imagen tomada unos 80 minutos después del impacto del fragmento R. El objeto brillante de la izquierda es Io.



EFECTOS SOBRE LOS SATÉLITES

Fueron muchos los observatorios que siguieron los impactos de los fragmentos del cometa Shoemaker-Levy 9, incluso indirectamente, registrando eventuales consecuencias sobre las características, especialmente la luminosidad, de los cuatro satélites principales de Júpiter: Ío, Europa, Ganimedes y Calisto. Se quisieron medir las fulguraciones que produjeron para saber si las caídas conllevaban un aumento significativo de la luminosidad de estos cuerpos. En ciertos casos, y coincidiendo con algunos impactos, pareció observarse un aumento de luminosidad de, más o menos, una o dos décimas de magnitud, en Europa y en Calisto.



Arriba, curva de luz de Europa, obtenida en Sierra La Nave (Sicilia), durante el impacto del fragmento A, ocurrido en el instante indicado por la flecha.

EL FUTURO DEL UNIVERSO

¿Cuál será el destino final de nuestro universo? Seguramente, esta pregunta es una de las más comprometidas, pero también una de las más frecuentes, que se plantean a los astrofísicos. La única respuesta cierta es que no hay respuesta cierta. Esto puede parecer un juego de palabras, pero las cosas son así. Los conocimientos actuales sobre nuestro universo todavía son insuficientes para poder predecir con certeza su evolución. Sin embargo, es posible esbozar algunos de los escenarios posibles.



Ciertas preguntas fundamentales a las que la astrofísica moderna intenta dar respuesta se refieren, sin duda, al origen y al futuro del universo. Naturalmente, no es posible hacer hipótesis sobre ningún escenario futuro de este universo si primero no se comprenden bien su nacimiento y su evolución.

A la primera de estas dos preguntas, la cosmología parece haber ofrecido una respuesta convincente. En especial, las teorías cosmológicas parecen converger sobre un modelo único, el del Big Bang. A lo largo de los años, este modelo se ha asentado con el descubrimiento del movimiento de recesión de las galaxias (1929) y el de la radiación cósmica de fondo (1965), una especie de eco cósmico dejado por la inmensa explosión que originó el universo.

¿UNA EXPANSIÓN SIN LÍMITE?

El modelo del Big Bang, lo mismo que explica el nacimiento y la evolución del universo, puede utilizarse para predecir su destino futuro. Naturalmente, la tarea no es fácil. Aplicando las oportunas ecuaciones matemáticas que regulan la expansión del universo, se obtienen soluciones que varían según sus características macroscópicas.

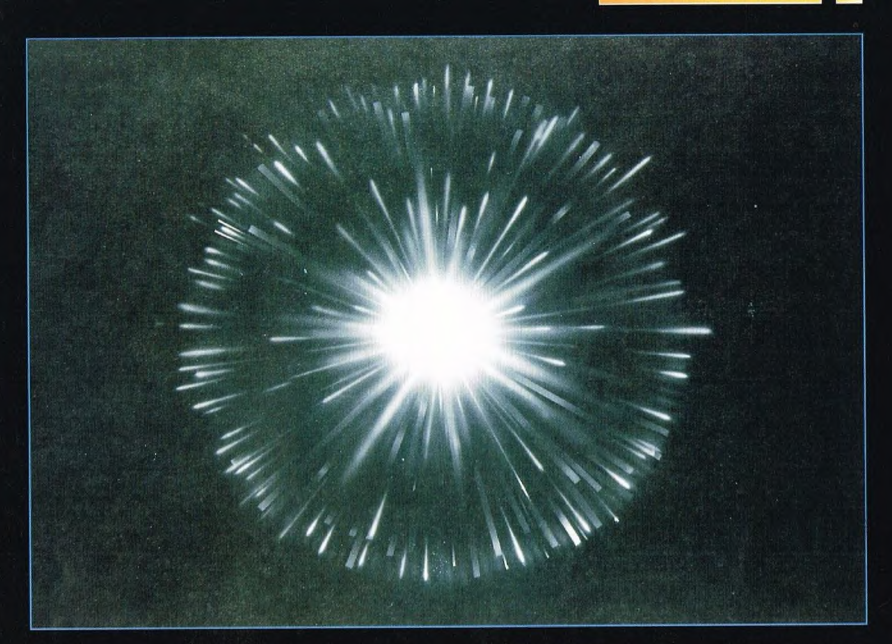
LOS UNIVERSOS POSIBLES

De la solución de las ecuaciones de Einstein, se deduce que la evolución del universo seguirá caminos diferentes, dependiendo de que su densidad sea mayor o menor que un determinado valor crítico. Si fuese inferior a la densidad crítica, no existiría bastante masa para frenar gravitatoriamente la expansión del universo. Sus límites, por tanto, tenderían a ampliarse indefinidamente, lo que haría que su dispersión fuera cada vez mayor. En este caso, los cosmólogos hablan de un universo abierto. Por el contrario, si la densidad fuese mayor que la crítica, la expansión estaría destinada a perder velocidad, y a perderla más rápidamente cuanto mayor fuera la densidad efectiva. Esto se prolongaría hasta que sus dimensiones llegaran a un límite máximo.

Superado este límite, el movimiento a gran escala del universo cambiaría de dirección y sufriría una inexorable contracción que lo conduciría, más o menos tarde, a colapsarse sobre sí mismo, produciendo el llamado Big Crunch, equivalente espectacular del Big Bang. En este caso, se



Albert Einstein (a la derecha) y Wechsler Israel. El gran científico y premio Nobel ha tenido una gran influencia en el concepto de universo que formulan los cosmólogos modernos.



habla de universo cerrado. En cambio, si la densidad del universo fuese igual a la crítica, su expansión tendería igualmente a hacerse más lenta, como en la situación de universo abierto, pero sin detenerse nunca completamente. Por tanto, esta condición representa la línea límite entre los dos tipos de universos posibles.

LAS SOLUCIONES DE LAS ECUACIONES DE EINSTEIN

Según el valor del parámetro de desaceleración, las soluciones de las ecuaciones de Einstein adquieren una forma analítica diferente. Como el parámetro de desaceleración depende de la densidad del universo ρ y de la constante de Hubble H_0, las diversas soluciones tienen un significado astrofísico muy preciso. En particular, la dependencia del parámetro de desaceleración de estas dos magnitudes viene expresada por la siguiente igualdad:

$q_0 = 4/3\pi(G\rho)/H_0^2$

donde *G* representa la constante de la gravitación universal. Así pues, el destino final del universo depende particularmente del hecho de que q_0 sea mayor o menor que 1/2. Este valor numérico no es casual, sino que tiene un significado físico muy preciso. En realidad, esta desigualdad equivale a establecer si la densidad ρ del universo es menor o mayor que una cierta densidad crítica ρ_c, que viene dada por la expresión:

$\rho_c = 3\,H_0^2/8\pi G$

En la figura inferior de la página siguiente se presenta la evolución del radio del universo *R(t)* en función del tiempo para diversos valores del parámetro de desaceleración.

a) $q_0<1/2(\rho<\rho_c)$; b) $q_0>1/2(\rho>\rho_c)$; c) $q_0=1/2(\rho=\rho_c)$.

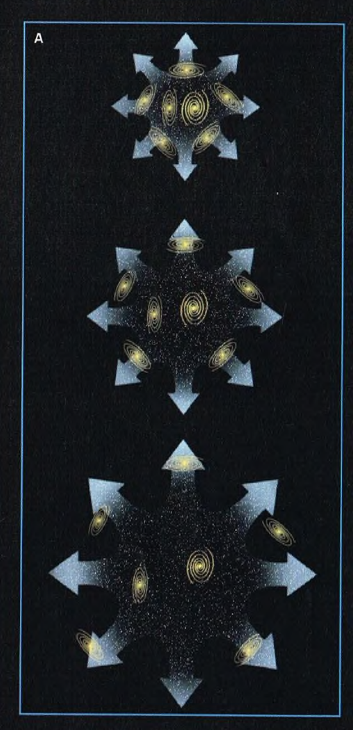
Arriba, representación pictórica de la gigantesca explosión del Big Bang, probable origen de nuestro universo.

LAS ECUACIONES DE EINSTEIN

La expansión del universo está descrita por un conjunto de ecuaciones conocidas como ecuaciones de Einstein y deducidas en base a la relatividad general formulada por el gran físico a principios de siglo. La solución de estas ecuaciones, calculadas para un tiempo dado *t*, da el radio del universo *R(t)* y su velocidad de expansión *V(t)*. Según los parámetros numéricos que aparezcan en las ecuaciones de Einstein, varía también la expresión numérica de sus soluciones *R(t)* y *V(t)*.

De acuerdo con las ecuaciones de Einstein, el coeficiente de expansión del universo y, por tanto, su evolución futura, depende del valor de un parámetro crítico fundamental llamado parámetro de desaceleración, que suele indicarse con el símbolo q_0. Esencialmente, el parámetro de desaceleración indica si el movimiento de expansión sufre o no una disminución de velocidad en el transcurso del tiempo y, en caso afirmativo, de qué magnitud.

Contiene, además, otras dos cantidades fundamentales: la constante de Hubble H_0, que determina la velocidad de expansión del universo a una distancia dada, y la densidad ρ del propio universo.





A la izquierda, escenarios posibles de la evolución del universo según los modelos cosmológicos: a) el universo continúa expandiéndose cada vez más, como hasta ahora; b) la expansión termina cuando sus dimensiones han llegado a un máximo. En este caso, el universo empieza a contraerse hasta colapsarse sobre sí mismo.

EL VALOR DE LA DENSIDAD CRÍTICA

Por tanto, la hipótesis sobre el destino del universo se hace mediante una simple desigualdad. En realidad, y tal como suele ocurrir en astronomía, se trata de un supuesto que no tiene nada de banal. En primer lugar, para poder establecer una comparación es necesario conocer exactamente el valor de la densidad crítica, que, a su vez, depende directamente de la constante de Hubble, de un valor no determinado. Probablemente, la determinación exacta del valor de la constante de Hubble es la cuestión más importante de toda la cosmología y ha catalizado las investigaciones de los cosmólogos durante unos 60 años. Como es sabido, la constante de Hubble representa el ritmo de expansión del universo a diversas distancias. Esto hace que deba deducirse comparando la velocidad de alejamiento de algunas galaxias (calculada según el desplazamiento de la longitud de onda de sus rayas espectrales) y su distancia. Para que estas medidas tengan cierta credibilidad, es necesario, además, utilizar galaxias muy distantes y, por tanto, muy



A la izquierda, radio del universo en función del tiempo cósmico. Hay tres posibles evoluciones del universo: a) su densidad no es suficiente para detener su expansión y va dilatándose indefinidamente (universo abierto); b) la densidad del universo es suficiente para detener su expansión; su tamaño llega a un valor máximo para, después, empezar a contraerse sobre sí mismo (universo cerrado); la existencia del universo podría incluso repetirse cíclicamente; c) la densidad del universo es suficiente para disminuir su velocidad de expansión, pero no para detenerla por completo; el universo continúa expandiéndose, pero a menor velocidad.

Arriba, la galaxia elíptica gigante Centaurus *A, situada a unos 16 millones de años luz de la Tierra, es una fuente radio potentísima.*

débiles. Por si fuera poco, cuanto más distante está un objeto, más difícil es determinar su distancia. En cualquier caso, después de años de pacientes medidas, los astrónomos han logrado reducir razonablemente el campo de los valores posibles de la constante de Hubble. Hay dos escuelas de pensamiento según las cuales su valor estaría próximo, respectivamente a 50 y 100 km/(s Mpc). Esto significa que, por ejemplo, una galaxia a la distancia de 1 megaparsec (Mpc) se alejaría de la nuestra a una velocidad de 50 a 100 km/s, mientras que a una distancia de 100 Mpc se movería con una velocidad 100 veces mayor.

Una vez determinado el valor de la constante de Hubble, es necesario conocer también el valor



A la derecha, la expansión actual del universo hace que las galaxias se alejen cada vez más unas de otras, tal como se representa en la figura.



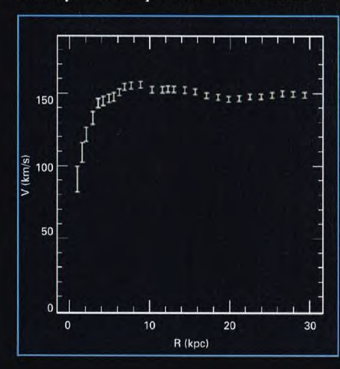
LA PRUEBA DE LA EXISTENCIA DE MATERIA OSCURA

El hecho de que la densidad de materia luminosa no sea un buen indicador de la densidad global de la materia del universo ya fue observado hace mucho tiempo por los astrónomos.
Uno de los primeros en advertirlo en los años treinta fue el astrónomo holandés Jan Oort. Por entonces, Oort estudiaba la influencia gravitatoria del disco galáctico sobre el movimiento de algunas estrellas próximas. Así, pudo medir la masa total del disco galáctico y, por tanto, demostrar que era casi el doble de la que se suponía en base al número total de estrellas y nebulosas observadas. De manera análoga, en 1933, Fred Zwicky, al estudiar la dinámica de algunos cúmulos de galaxias, llegó a la conclusión de que las que se habían observado constituían sólo la décima parte de la masa necesaria para mantener gravitatoriamente ligadas las galaxias del cúmulo. De manera independiente, ambos resultados mostraban que tanto en el interior como en el exterior de las galaxias debía existir mucha más materia de la que en realidad se podía observar.
Otra evidencia posterior de la existencia de una forma de materia oscura la proporcionaron los estudios efectuados sobre las velocidades de rotación de los brazos de las galaxias espirales, obtenidas mediante medidas espectroscópicas.
El diagrama que muestra el comportamiento de la velocidad de rotación en función de la distancia radial se llama curva de rotación de la galaxia y su forma depende de la masa de la propia galaxia. Pero, sorprendentemente, se observa una clara discrepancia entre la curva de rotación de una galaxia espiral, construida con los valores de velocidad medidos, y la prevista sólo en base a la materia luminosa. Mientras que, al aumentar la distancia al centro galáctico, la curva de rotación teórica tiende a aplanarse, la real sigue un comportamiento casi constante. Esto significa que la masa total de la galaxia está subestimada si sólo se considera la materia luminosa, y que, a grandes distancias del centro, probablemente en la llamada región del halo galáctico, debe existir una alta concentración de materia oscura.

de la magnitud que se desea comparar, es decir, la densidad del universo, y esto representa otro grave problema.

LA DENSIDAD TOTAL DEL UNIVERSO

Por tanto, para establecer el destino del universo, hay que poder medir su densidad y comprobar si es mayor o menor que la densidad crítica. Medir



Al lado, en el gráfico se representa la curva de rotación de una galaxia espiral.



Una de las primeras pruebas de la existencia en el universo de materia no visible la ha proporcionado el estudio de la velocidad de rotación de los brazos de algunas galaxias espirales, como, por ejemplo, la galaxia M51, conocida también con el nombre característico de Galaxia remolino (Whirlpool Galaxy).

la densidad del universo implica dos pasos sucesivos. En primer lugar, conocer sus dimensiones, que se estiman en base a la distancia de los cuerpos celestes más lejanos. A pesar de que es muy difícil obtener un valor preciso, se piensa que el radio del universo está comprendido entre 10.000 y 15.000 millones de años luz.

Por otra parte, calcular la cantidad total de materia que existe en el universo es un problema todavía mucho más arduo. Evidentemente, es posible medir la masa de los cuerpos celestes sólo si se sabe de su existencia, conocimiento que se limita a los que observamos gracias a su emisión de radiación electromagnética, ya sea en forma de luz visible, o mediante ondas radio o rayos X. Por este motivo, el punto de partida es el cálculo de la masa del universo en base al número total de estrellas y galaxias observadas o estimadas. Pero, haciéndolo así, quedan inevitablemente excluidos los cuerpos celestes que no emiten (o reflejan) radiación electromagnética, o que la emiten en cantidades insuficientes para ser detectadas. Estos cuerpos forman la llamada materia oscura. Para calcular el valor exacto de la masa total del universo, hay que considerar también la que representa la materia oscura, la cual, por razones obvias, es difícilmente estimable.

EL PROBLEMA DE LA MATERIA OSCURA

Según las estimaciones actuales, se piensa que la materia visible de nuestro universo puede representar solamente una centésima parte de la masa total necesaria para llegar a la densidad crítica. El resto debe estar formado por materia no visible, es decir, oscura. Naturalmente, el problema principal radica en comprender de qué está hecha la materia



oscura. Su naturaleza y su abundancia son uno de los problemas más interesantes de toda la cosmología. Según algunos cosmólogos, sería igual a la luminosa y, por tanto, de tipo bariónico (los bariones son una clase de partículas elementales de la cual forman parte los protones y los neutrones, que, porcentualmente, constituyen la mayor parte de la materia visible). Así, pues, al menos parcialmente, la materia oscura estaría compuesta por cuerpos de tipo rocoso, como por ejemplo planetas que orbitan alrededor de otras estrellas, asteroides y cometas. O, incluso, de estrellas muertas, como las enanas blancas o las estrellas de neutrones, demasiado viejas para dar fe de su existencia mediante la emisión de radiación. En ciertos casos, también podría tratarse de las llamadas enanas marrones, unos cuerpos celestes que se encuentran prácticamente en la frontera que separa los planetas de las estrellas.

En efecto, las enanas marrones tienen una masa comparable a la de Júpiter y, por tanto, no son suficientemente masivas para provocar la fusión del hidrógeno y convertirse en estrellas. Finalmente, también hay que tener en cuenta la materia que llena el espacio interestelar, así como el gas intergaláctico. Otra posibilidad es que parte de la materia oscura esté también formada por partículas elementales que interaccionan débilmente con la materia ordinaria y que, por tanto, son muy difíciles de detectar. Una clase de estas partículas son los neutrinos, de los que el universo debería estar literalmente lleno, dado que se producen durante las reacciones nucleares que alimentan la vida de las estrellas. Además de los neutrinos, hay otras familias de partículas elementales, muchas de las cuales son todavía objeto de especulaciones teóricas.

Arriba, fotografía del observatorio de Leyden, en Holanda. Jan Oort dirigió durante mucho tiempo este observatorio, del que hizo un centro de fama mundial.

¿UN UNIVERSO ABIERTO O CERRADO?

La incertidumbre siempre dominante sobre la masa del universo y sobre el valor de la constante de Hubble no permite establecer todavía con exactitud cuál es el escenario evolutivo correcto. Sin embargo, buena parte de los cosmólogos considera que la densidad del universo está próxima a la crítica y que, por tanto, se encuentra a medio camino entre las dos condiciones de universo cerrado y abierto.

Naturalmente, el destino del universo no es un problema que deba preocuparnos a nosotros o a nuestros descendientes, si no es desde un punto de vista puramente intelectual. En efecto, los tiempos evolutivos previstos según estos escenarios son del orden de las decenas de miles de millones de años.

Abajo, la nebulosa planetaria M57 en la constelación de la Lira. Las nebulosas planetarias son residuos de la evolución de estrellas como el Sol, que expulsan sus capas más externas tras la fase de gigante roja.



Abajo, huellas de partículas presentes en un antiguo meteorito. Estos objetos nos proporcionan informaciones sobre el origen del sistema solar.



ASTRONOMÍA Y ASTROLOGÍA

Astronomía y astrología tienen mucho más en común que la simple raíz de sus nombres: los orígenes de ambas disciplinas son comunes.



Los orígenes de la astronomía y de la astrología son remotos. Ambas disciplinas nacieron del deseo de conocer el universo del que formamos parte.

Desde la Antigüedad, el hombre se había dado cuenta de ciertas periodicidades: en primer lugar de las estacionales y, cuando se dedicó al cultivo de la tierra, pensó que le convenía intentar hacer previsiones acerca de la llegada de las estaciones para, así, poder normalizar las actividades agrícolas y obtener buenas cosechas. Observó que la estación calurosa correspondía a períodos de más insolación y con el Sol más alto en el firmamento. En cambio, la estación fría se caracterizaba por días cortos y una posición del Sol más baja en el horizonte durante todo el día. Por tanto, existía una relación entre el comportamiento del astro diurno y la alternancia de las estaciones. Afinando sus observaciones de la bóveda estelar, vio que también las constelaciones cambiaban el período de observabilidad según la época, hasta el punto que era posible determinar, para cada estación, el grupo de constelaciones que eran invisibles durante aquel período. Así pues, fue bastante natural pensar que, como había una relación entre los astros y las variaciones climáticas estacionales, seguramente aquéllos podían influir en las actividades humanas y en la vida de cada ser vivo. Por esto, astronomía y astrología nacieron prácticamente al mismo tiempo.

EL PAPEL DE LOS PUEBLOS MESOPOTÁMICOS

Actualmente, cuando se oye hablar de astrología, se piensa sobre todo en los signos zodiacales y en los horóscopos. No hay persona que no conozca el signo zodiacal que le corresponde, independientemente de que crea o no lo que dicen los horóscopos difundidos por los medios de comunicación o preparados expresamente por astrólogos. Pero, ¿cuántas conocen el origen de los signos del zodíaco? ¿Y cuál es, si lo hay, el nexo entre estos últimos y las constelaciones zodiacales?

La historia empieza hace más de dos mil años en la antigua Mesopotamia, actual Iraq. Los astrónomos babilonios fueron los que introdujeron las 12 constelaciones del zodíaco. ¿El motivo de este invento? Las órbitas descritas por la Luna y los planetas están en una franja estrecha, llamada banda zodiacal, que contiene la eclíptica y coincide con el recorrido anual del Sol. Por tanto, era importante reconocer las estrellas próximas a la eclíptica, sobre todo por razones de calendario, ya que, en la cuenta del tiempo de muchas culturas antiguas, la Luna e incluso Venus y los demás planetas tenían un papel privilegiado, y en las civilizaciones mesopotámicas no eran una excepción. Una simplificación notable se consiguió agrupando en constelaciones algunas estrellas de la región de la bóveda celeste situadas a lo largo de la eclíptica. Sin embargo, tales agrupaciones eran de dimensiones variables, lo cual no se correspondía con la división del año babilonio en 12 meses lunares de duración casi igual. Hoy sabemos que 12 meses lunares no son un año, pero para los babilonios esto no era un gran problema: periódicamente añadían un decimotercer mes, más o menos como nosotros añadimos un día al mes de febrero en los años bisiestos. La necesidad de tener intervalos celestes iguales hizo que nacieran los signos zodiacales: 12 zonas de la bóveda celeste de igual amplitud, cuyo nombre venía dado por la constelación zodiacal más próxima. Fue entonces cuando los signos se convirtieron en referencia para la posición de los planetas y de la Luna, lo mismo que ocurre con un sistema de coordenadas.



Antiguamente los fenómenos celestes que se alejaban de la normalidad, como un eclipse o la aparición de un cometa, eran interpretados como signos del destino, precursores de grandes acontecimientos en la historia de la humanidad. Sólo con la previsión de estos fenómenos y el conocimiento de su naturaleza pudo combatirse lo que eran meras supersticiones.



Kepler fue uno de los últimos astrónomos que creyó en la astrología. Con la invención del catalejo (Galileo) y el descubrimiento de la ley de la gravitación universal (Isaac Newton), astronomía y astrología se separaron definitivamente.

LA PRECESIÓN

En la época de la antigua Grecia, los signos zodiacales se vincularon a los equinoccios: en el siglo IV a.C., se decidió que el zodíaco empezaría con el signo más cercano al equinoccio de primavera. Como en aquella época el punto equinoccial, es decir, el punto en el que la eclíptica cruza el ecuador celeste, se encontraba en la constelación de Aries, éste fue el primer signo zodiacal. Más tarde, el punto equinoccial de primavera se conoció con el nombre de punto Aries y, cuando Hiparco descubrió el fenómeno de la precesión de los equinoccios, Aries siguió siendo el primer signo del zodíaco, a pesar de que luego este equinoccio se desplazó a la constelación de Piscis y, alrededor del año 2600, pasará a la de Acuario.



Miniatura florentina del siglo XV en la que se representan todos los signos zodiacales. Los doce signos del zodíaco fueron introducidos por los astrónomos babilonios en una época remota. Los astrónomos griegos relacionaron los signos con los equinoccios e hicieron comenzar el zodíaco en Aries.

LA DIVISIÓN DE DOS MUNDOS

Astronomía y astrología se desarrollaron a la par a lo largo de los siglos, con astrónomos que eran también astrólogos y viceversa. Uno de los casos más notables fue, quizá, el de Kepler, descubridor de las tres leyes que regulan el comportamiento orbital de los planetas. Este gran astrónomo alemán, que vivió poco antes de la invención del telescopio, todavía creía en las prácticas astrológicas, hasta el punto que él mismo hacía sus propios horóscopos. Sin embargo, poco después, las dos prácticas se separaron de modo irreversible. Esto ocurrió con el impulso que Galileo y Newton dieron a la astronomía: sus rigurosas investigaciones matemáticas y observacionales concentraron la atención sobre todo en el aspecto físico de los objetos celestes, que quedaron desvinculados del mundo terrestre, excepto para influencias de tipo gravitatorio. Por el contrario, la astrología continuó por su camino de siempre, invocando el influjo de los astros sobre la psique humana y los hechos de la vida. La astronomía, que hasta entonces se había ocupado principalmente de las posiciones de objetos celestes, se convirtió en una ciencia física que buscaba las causas de los movimientos visibles en el firmamento e investigaba la constitución y la naturaleza de los cuerpos que pueblan la esfera celeste.

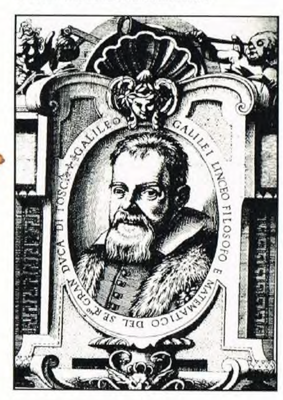
Hay también otra diferencia en el enfoque de ambas disciplinas: mientras que la astronomía pretende una difusión capilar de los conocimientos adquiridos (en efecto, muchas veces, el científico siente la necesidad de comunicar incluso a los profanos sus descubrimientos), la astrología parece ser todavía feudo de un círculo de personas poco propensas a practicar la divulgación. Si la plena comprensión de la astronomía exige el empleo de un lenguaje difícil como es el científico, y su progreso está ligado al uso de unas matemáticas avanzadas poco intuitivas, en cambio, la astrología está envuelta en un halo de misterio que contribuye poco a su conocimiento. Casi todos leemos los horóscopos, aunque sólo sea por puro juego, pero pocos de nosotros sabemos en base a qué principios se formulan.

Astrólogos y astrónomos están hoy en conflicto, lo que atestigua una fractura incurable entre dos mundos que antiguamente estaban unidos por lazos muy estrechos. El diálogo entre las dos disciplinas parece imposible, ya que las metodologías que utilizan para los estudios de los respectivos campos son distintas. Además, en los debates entre sus respectivos representantes hay la tendencia a rebatir las tesis del adversario recurriendo a argumentos típicos de la esfera de actividad propia, lo que hace que la discusión sea totalmente infructuosa.

En una época dominada en apariencia por el conocimiento racional del mundo, el papel que la astrología ha conseguido conservar es, según parece, relativamente importante, aunque resulta difícil saber cuántas personas creen en las predicciones astrológicas y se dejan influir por ellas, y qué parte de la humanidad –aunque sólo sea la del mundo occidental– participa en el conocimiento científico y sus métodos.

Quizá el dualismo astrología-astronomía refleja más que en ningún otro campo el contraste entre una investigación de tipo racional y otra de carácter más irracional.

La astronomía moderna nació con Galileo Galilei, que codificó el método científico y utilizó su catalejo para estudiar los cuerpos celestes, sentando así las bases para el desarrollo de la ciencia moderna.



LAS LEYES DE LA ÓPTICA

Desarrollada a partir de las observaciones efectuadas por los antiguos sobre la propagación de la luz, la óptica ha sido objeto de estudios profundos que han permitido en tiempos recientes aplicaciones extraordinarias.



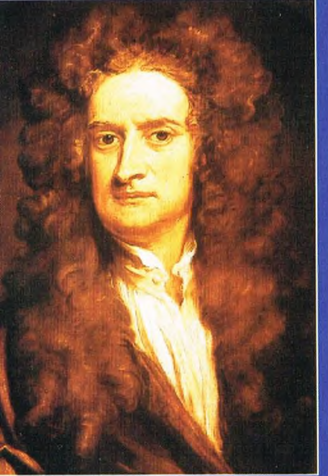
La óptica es la parte de la física que estudia los fenómenos luminosos y las leyes que regulan su comportamiento. En general, esta ciencia se divide en óptica geométrica y óptica ondulatoria.

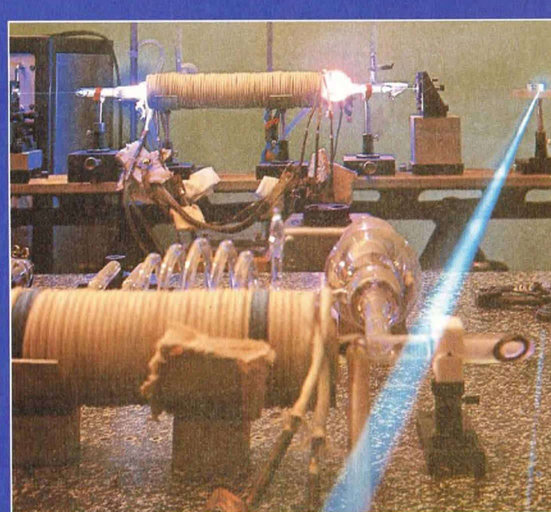
La óptica geométrica estudia los fenómenos que se producen cuando un haz de radiación luminosa incide sobre cuerpos transparentes u opacos, o bien interfiere con otras radiaciones luminosas. Su teoría, de tipo geométrico, parte de la presunción de que la luz se propaga en línea recta en un medio homogéneo (es decir, de densidad constante).

La óptica ondulatoria se ocupa de los fenómenos de difracción, interferencia y polarización, que pueden explicarse admitiendo la naturaleza ondulatoria de la luz. En efecto, esta teoría supone que la luz se propaga según ondas transversales; los rayos luminosos son las trayectorias perpendiculares a la superficie de la onda.

La óptica ondulatoria también se ocupa de la emisión y la absorción de la radiación. Así pues, en este sentido, la luz es sólo una parte (la visible por el hombre) del espectro electromagnético, es decir, del conjunto de todas las radiaciones, con energías diversas, que se extiende desde los rayos gamma, de longitud de onda cortísima, hasta las ondas hertzianas utilizadas para transmitir sonidos o imágenes.

Isaac Newton fue uno de los partidarios de la teoría corpuscular de la luz.



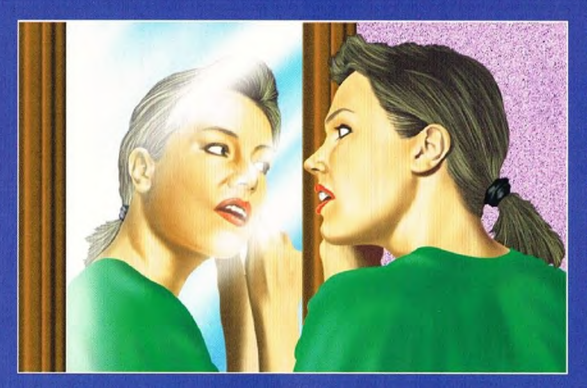


Si un rayo de luz (incluso láser, como en la fotografía) incide sobre un espejo, la luz es reflejada hacia atrás.

UN POCO DE HISTORIA

La propagación rectilínea de la luz era un fenómeno que ya conocían los babilonios. Mientras Platón, Demócrito y Euclides consideraban que los objetos visibles eran alcanzados por algo que emitía el ojo del observador, Aristóteles pensaba que entre el ojo y el objeto se interponía un medio, lo mismo que ocurre con el sonido (el aire se interpone entre la fuente sonora y el oído). Fueron los árabes los que rechazaron por primera vez estas teorías y cambiaron la idea básica. Según ellos, eran los objetos los que emitían la luz que llegaba al ojo y los hacía visibles.

En Occidente, Roger Bacon fue el primero en describir el fenómeno de la reflexión y de la refracción, pero el núcleo fundamental de las leyes de la óptica fue elaborado por Kepler y, sobre todo, por Descartes, que formuló la ley de la



Las imágenes del espejo son, precisamente, especulares, un reflejo de aquéllas de las que parte la luz.

refracción, también hallada independientemente por Snell.

Newton sostuvo la teoría corpuscular de la luz, según la cual, los rayos luminosos están formados por partículas pequeñísimas. Construyó el primer telescopio reflector y demostró que la luz blanca puede descomponerse en los colores del arco iris si se hace pasar a través de un prisma. En contraposición a la teoría de Newton, la de Huygens establecía la naturaleza ondulatoria de la luz. Según esta teoría, la luz consiste en vibraciones transversales de un medio elástico que debe llenar el espacio (luego, este medio se llamó éter). En el siglo XIX, los experimentos confirmaron la teoría de las ondas, con los experimentos de Young sobre la interferencia y de Fresnel sobre la difracción. En 1865, Maxwell publicó la teoría electromagnética de la luz.

El descubrimiento del efecto fotoeléctrico, incompatible con la naturaleza ondulatoria de los rayos luminosos, indujo a los físicos a formular la hipótesis de que la luz está compuesta de cuantos de energía, los fotones, lo que fue el primer paso hacia la elaboración de la moderna física cuántica.

ÓPTICA GEOMÉTRICA

A la luz de las teorías modernas, la óptica geométrica es una simplificación de la realidad. En efecto, la hipótesis en que se basa es un esquema que no tiene en cuenta el mecanismo real de propagación de la luz. Sin embargo, permite explicar correctamente las leyes de la reflexión y de la refracción. Un límite a la validez de esta teoría son los fenómenos de difracción. La dispersión de partículas a través de rendijas estrechísimas sólo puede explicarse con la teoría ondulatoria de la luz.

Por tanto, en los casos en que las dimensiones del sistema óptico son mucho mayores que la longitud de onda de la luz que se emplea, esta teoría puede emplearse de una manera válida. Como estas condiciones son las que encontramos en la vida cotidiana (por ejemplo, en el uso de espejos o de lentes), el estudio de la óptica geométrica, gracias también a su relativa sencillez, tiene un papel fundamental.

En la óptica geométrica, las fuentes luminosas están representadas por puntos simples o por conjuntos de puntos de los que salen rayos de luz rectilíneos. Las propiedades ópticas de los materiales que constituyen los objetos se caracterizan por un número *n* llamado índice de refracción.

Un rayo de luz blanca se descompone en los colores del espectro.



REFLEXIÓN

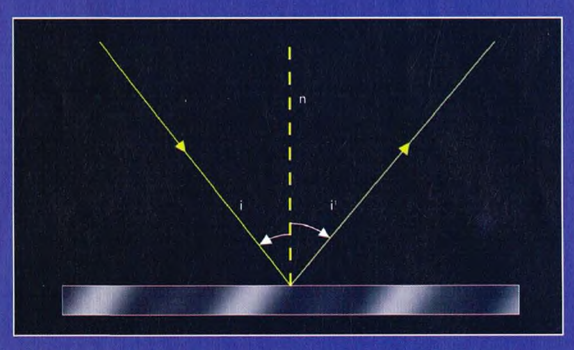
El fenómeno de la reflexión se produce cuando una onda luminosa incide sobre una superficie lisa que separa dos medios y es remitida hacia la fuente.

En el caso de que la velocidad de propagación de la radiación luminosa sea distinta en los dos medios, una parte retrocede hacia el mismo medio (reflexión), mientras que la restante pasa a través del segundo medio (refracción). La relación entre la energía de la luz reflejada y la de la luz incidente se llama factor de reflexión.

En el fenómeno de la reflexión, la perpendicular a la superficie reflectante, el rayo incidente y el reflejado están en el mismo plano; el ángulo de incidencia (el ángulo entre el rayo incidente y la normal a la superficie) es igual al de reflexión, que es el ángulo entre el rayo reflejado y la perpendicular.

Estas leyes pueden comprobarse experimentalmente, pero también es posible deducirlas del principio de Huygens-Fresnel, según el cual, la onda reflejada (y también la refractada) está formada por la envolvente de las ondas elementales producidas al mismo tiempo en puntos distintos de la superficie. El rayo reflejado es perpendicular a la onda reflejada, como el rayo incidente respecto a la onda incidente. Las leyes de la reflexión también pueden derivarse del principio de Fermat, según el cual el rayo incidente se divide en dos partes, de manera que satisface las condiciones para las cuales el recorrido entre dos puntos, a través de la superficie de separación, se realiza en un tiempo mínimo.

Utilizando la teoría electromagnética es posible ampliar las leyes de la reflexión a todas las longitudes de onda del espectro.



Arriba, esquema de la ley de reflexión; i e i' indican, respectivamente, el ángulo de incidencia y el de reflexión; n es la perpendicular al punto de incidencia.

REFRACCIÓN

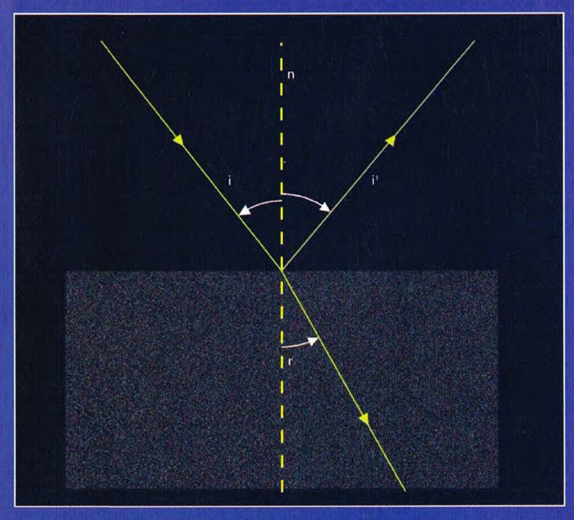
La refracción es la desviación en la trayectoria de una onda. Tiene lugar cuando ésta atraviesa la superficie de separación de dos medios diferentes. La alteración de la dirección es producida por el cambio de velocidad debido a la variación de las características del medio por el que la onda se propaga.

Además de la refracción sobre la superficie de separación de los dos medios, en estos casos casi siempre se produce también una reflexión parcial de la onda incidente.

También en la refracción, el rayo incidente, el refractado y la normal a la superficie están en el mismo plano.

Las leyes de la refracción se deducen del principio de Huygens-Fresnel. Su

Ley de la refracción: una parte del rayo es reflejada; la otra, desviada, atraviesa la superficie (ρ es el ángulo de refracción).



REFLEXIÓN TOTAL

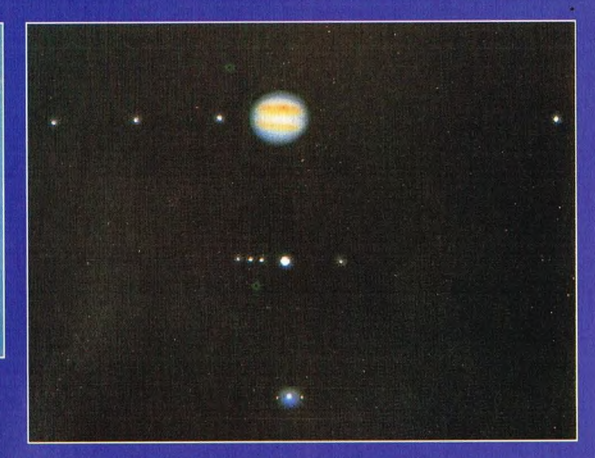
La reflexión total tiene lugar cuando un rayo de luz incide sobre una superficie entre dos medios y es totalmente reflejada sin que haya refracción. Si el rayo proviene de un medio con índice de refracción mayor, n_2, e incide sobre la superficie de contacto de un material de índice de refracción menor, n_1, se refleja totalmente en caso de que

$$\sin \alpha = \frac{n_1}{n_2}$$

donde α es el ángulo de incidencia. Por tanto, existe un ángulo de incidencia tal que, para ángulos mayores, se tiene una reflexión total. Este ángulo se llama ángulo límite.



Arriba, la imagen del lápiz aparece quebrada a causa de la refringencia: en el agua, el rayo desvía su dirección.



Júpiter y sus satélites vistos desde la Tierra. Fueron descubiertos por Galileo Galilei, que los dedicó a la familia de los Medici.

aplicación permite establecer que la envolvente de las ondas en el segundo medio forma el frente de la onda refractada.

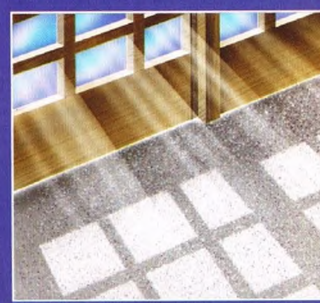
Cuando la velocidad de propagación v_1 en el primer medio es superior a la v_2 del segundo, el ángulo *r* que la onda refractada forma con la normal a la superficie es menor respecto al de incidencia *i*, según la ley:
sen i/sen r = v_1/v_2

Esta relación depende de la naturaleza de los medios y es una constante específica que se llama índice de refracción relativo n_{12}. Cuando el primer medio es el vacío, se dice que el índice es absoluto.

LA BIRREFRINGENCIA

La birrefringencia, o doble refracción, es un fenómeno que se observa cuando una radiación luminosa incide sobre un medio no isótropo. En tal caso, la onda se descompone en otras dos distintas que se propagan en direcciones diferentes. La primera sigue las leyes normales de la refracción y se llama rayo ordinario; la otra tiene una velocidad y un índice de refracción variables y se llama rayo extraordinario. Ambas ondas están polarizadas perpendicularmente. El cristal utilizado para poner de manifiesto la birrefringencia suele ser la calcita o espato de Islandia.

La luz se filtra a través de los cristales, a pesar de que sufre refracción.



LOS TELESCOPIOS

Las leyes de la óptica tienen su principal aplicación en los telescopios, instrumentos que sirven para recoger con un objetivo la luz procedente de los objetos celestes, concentrarla en un punto –el foco– y producir a la salida una imagen ampliada del objeto. Sin embargo, hoy se designan con este nombre todos los aparatos que recogen la radiación electromagnética y que utilizan las técnicas más diversas.
Los telescopios ópticos funcionan por refracción o por reflexión para recoger los rayos luminosos y, según cuál sea el modo de captar la luz, se llaman refractores o reflectores. Los refractores utilizan una lente como objetivo y, los reflectores, un espejo. El primer telescopio fue un refractor. Lo construyó alrededor de 1608 Hans Lippershey, un fabricante de lentes holandés. El empleo de este nuevo instrumento permitió a Galileo Galilei hacer importantes descubrimientos, como las fases de Venus y los satélites de Júpiter, que dedicó a la familia de los Medici. La idea de utilizar un espejo en lugar de la lente se debe a Nicolo Zucchi, aunque el primero que construyó un telescopio reflector fue Isaac Newton en 1671.
Los primeros telescopios recogían la luz gracias a un objetivo (lente o espejo) de pocos centímetros de diámetro, mientras que hoy se pueden construir reflectores enormes dotados de espejos de varios metros de diámetro. En este siglo, la contaminación luminosa, debida a las luces de las ciudades, ha obligado a los astrónomos a construir los observatorios con telescopios ópticos en cumbres montañosas o altiplanos desiertos situados a grandes altitudes. Pero, a pesar de todos los esfuerzos, la observación desde tierra está obstaculizada inevitablemente por la atmósfera, y el único modo de eliminar el problema es mandar telescopios al espacio, más allá de la atmósfera terrestre, tal como se ha hecho con el telescopio espacial Hubble.

CÓMO LLEGAR A SER ASTRONAUTA

A pesar de que el transbordador espacial pone en órbita casi cada mes entre cinco y siete astronautas, el sueño de muchos jóvenes estadounidenses de viajar al espacio sólo se hace realidad para unos pocos. En otros países, la situación todavía es peor.



Seguramente la NASA, la agencia espacial estadounidense, es la que ofrece mayores oportunidades a las personas que desean convertirse en astronautas.

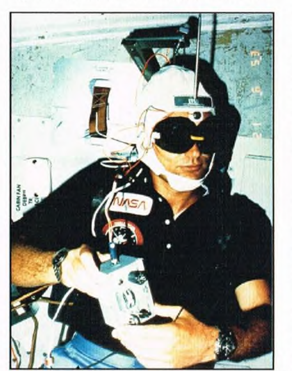
En el grupo de los cosmonautas rusos es prácticamente imposible ser aceptado. A pesar de que hay personas que han volado a bordo de cápsulas rusas, lo han hecho como pasajeros de pago y no como verdaderos astronautas. Por otra parte, las demás naciones tienen tan pocos astronautas y vuelan tan poco, que es más fácil ganar la lotería que pensar en ser admitido para esta misión.

La Agencia Espacial Europea también ofrece algunas oportunidades, ya sea porque participa en las investigaciones espaciales a bordo del transbordador estadounidense y de la MIR, la estación espacial rusa, o porque tendrá una parte importante en la construcción y uso de la estación internacional espacial Alpha.



La tripulación de la misión del transbordador nº 35 se dispone a entrar en la cápsula para el lanzamiento.

El astronauta Norman E. Thagard en un experimento médico a bordo del transbordador.



PILOTO DE TRANSBORDADOR

Ser piloto de transbordador estadounidense requiere una excepcional experiencia de vuelo con los jets más veloces. Esto significa tener detrás una intensa carrera militar.

Si no se tiene este currículum, puede ser nombrado especialista de misión. Pero también en este caso se preferirá una persona que, además de otros requisitos, posea una licencia de vuelo, aunque no sea profesional, y no otra que nunca haya pilotado un avión.

Por ejemplo, de los 45 astronautas seleccionados por la NASA entre 1984 y 1988, 43 tenían experiencia militar o trabajaban directamente para esta agencia estadounidense. De los dos restantes, uno era consultor de la agencia espacial estadounidense y otro fue Mae Jeminson, la primera mujer de color que llegaba a ser astronauta.

Un mérito importante es ser licenciado en una determinada disciplina y tener notables capacidades manuales para otras actividades y, sobre todo, estar en condiciones de efectuar los complejos trabajos de a bordo que exige la alta tecnología de un transbordador.

Evidentemente, para poder acceder a la carrera de astronauta hay que gozar de excelentes condiciones físicas.

Es obvio que, si se ha superado el examen para ser piloto de reactor, se está en una buena posición para llegar a ser astronauta. En caso contrario, las posibilidades de ser seleccionado son casi nulas.

BÚSQUEDA DE CANDIDATOS PARA EL TRANSBORDADOR

NASA
National Aeronautics and Space Administration,
Lyndon B. Johnson Space Center,
Houston, Texas.
La NASA necesita seleccionar candidatos pilotos astronautas y especialistas de misión para continuar su programa de vuelos con el transbordador espacial.
Se tomarán en consideración los candidatos procedentes tanto del sector civil como del militar.

UNA FUERTE MOTIVACIÓN

Un buen astronauta ha de poseer una gran capacidad para hablar ante el público, tener ideas preferentemente tradicionalistas y atenerse a un comportamiento estándar. En efecto, las relaciones públicas son una parte importante del duro trabajo que le espera al astronauta y en todos los casos, debe preservarse la imagen de la NASA.

Pero la NASA selecciona sobre todo a personas muy motivadas para la conquista del espacio y que hayan mostrado esta tendencia en su vida.

Actualmente, la única posibilidad de los astronautas es viajar en un transbordador. A pesar de los repetidos rumores sobre un nuevo alunizaje o sobre la conquista de Marte, todavía no hay nada concreto.

Pero, para comprender realmente las características que ha de tener un candidato que desee entrar en el cuerpo de astronautas de la NASA y cuáles serán las obligaciones a las que deberá enfrentarse, conviene hacer referencia a un anuncio de búsqueda publicado por la propia NASA.

DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DEL TRANSBORDADOR ESPACIAL

Los numerosos vuelos cumplidos con éxito por el transbordador espacial han demostrado que las investigaciones y los experimentos en el espacio están convirtiéndose en una rutina. Hoy, el orbitador del transbordador espacial puede ser puesto en órbita terrestre al menos una vez cada 30 días.

La facilidad de manejo del transbordador permite, durante las diversas misiones, colocar en órbita terrestre o retirar de ella satélites de varias dimensiones y hacer investigaciones en diversas disciplinas, así como muchas otras operaciones.

Estas misiones tienen por objeto desarrollar la experiencia para construir en los próximos años una importante estación espacial alrededor de la Tierra.

Generalmente, la tripulación está compuesta por cinco personas: el comandante, el piloto y tres especialistas de misión. Es posible que, ocasionalmente, se añadan otros componentes a la tripulación.

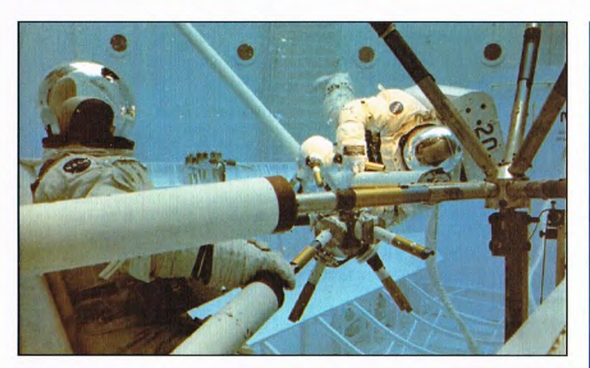
PILOTO ASTRONAUTA

Los pilotos astronautas pueden ser elegidos para el cargo de comandante del transbordador. Durante el vuelo, el comandante asume la responsabilidad del vehículo, de la tripulación, del éxito de la misión y, naturalmente, de la seguridad del vuelo.

El segundo piloto asiste al comandante en el control y la operatividad del vehículo. Además, el piloto puede asistir en las operaciones de puesta en órbita o de captura de un satélite utilizando el brazo mecánico que hay en la bodega del transbordador, o bien participar en actividades extravehiculares u otras operaciones necesarias para cumplir el plan de vuelo.

La astronauta Anna L. Fisher se dispone a experimentar una disminución artificial de la gravedad en un tanque de entrenamiento de la NASA.





Dos astronautas simulan la ausencia de peso en un tanque lleno de agua preparado para esta operación.

ASTRONAUTA ESPECIALISTA DE MISIÓN

El especialista de misión, que trabaja en estrecho contacto con el comandante y con el piloto, tiene la responsabilidad de coordinar las operaciones que se desarrollan en el área de actividades de investigación y experimentos. Es responsable también de los materiales empleados para efectuarlas. El especialista de misión debe conocer con detalle las características operativas de los experimentos que se le confían y los objetivos de la misión. Además, ha de estar en condiciones de operar fuera del transbordador si así lo exige el plan de vuelo.

CARACTERÍSTICAS PSÍQUICAS PARA LLEGAR A SER ESPECIALISTA DE MISIÓN O PILOTO ASTRONAUTA

EL CANDIDATO A ESPECIALISTA DE MISIÓN DEBE CUMPLIR LOS REQUISITOS SIGUIENTES:

1. Ser titulado en ingeniería, ciencias biológicas, ciencias físicas o matemáticas. La titulación ha de estar seguida de, al menos, tres años de experiencia profesional. Es deseable una especialización en el mismo campo que, en parte, puede sustituir la experiencia práctica que se exige. La calidad de la preparación académica tiene una gran importancia.
2. Ha de reunir unas características físicas adecuadas al vuelo espacial de clase II, entre ellas:

- agudeza visual: 20/50 o mejor, si no corregida, corregible a 20/20
- presión sanguínea: 140/90 medida en posición de reposo
- estatura: entre 148,5 y 193 cm

EL CANDIDATO A PILOTO ASTRONAUTA DEBE CUMPLIR LOS REQUISITOS SIGUIENTES:

1. Ser titulado en ingeniería, ciencias biológicas, ciencias físicas o matemáticas y tener, al menos, tres años de experiencia profesional. Es deseable una especialización en el mismo campo. La calidad de la preparación académica es importante.
2. Tener, al menos, 1.000 horas de vuelo en calidad de piloto comandante de reactor.
   La experiencia adquirida como piloto de pruebas es un factor preferencial.
3. Poseer unas características físicas adecuadas al vuelo espacial de clase I, que incluye estas cualidades específicas:

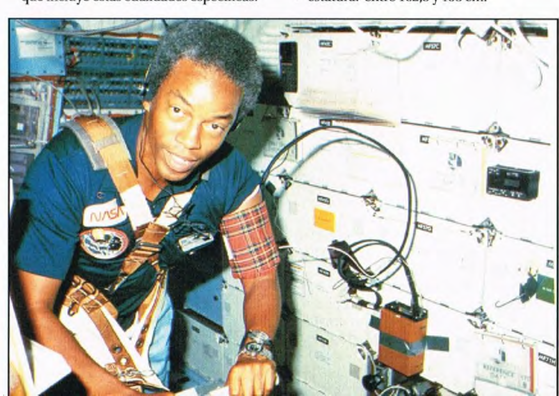
- agudeza visual: 20/50 o mejor, si no corregida, corregible a 20/20
- presión sanguínea: 140/90 medida en posición de reposo
- estatura: entre 162,5 y 193 cm.

DÓNDE ENVIAR LAS SOLICITUDES

Por lo que se refiere a Estados Unidos, las solicitudes de civiles han de enviarse a:

NASA Johnson Space Center
Astronaut Selection Office
ATTN: AHX
Houston, TX 77058

Las solicitudes se aceptan continuamente. Cuando la NASA decide seleccionar nuevos astronautas, sólo toma en consideración las peticiones llegadas hasta aquel momento. Las que se reciben después del día de la decisión, se utilizarán para la selección siguiente. Cada año, todos los que aspiran a la selección han de renovar su solicitud.
Quienes están prestando el servicio militar y aspiran a ser seleccionados han de presentar la petición en su propio distrito militar.
Aquellos que superan una primera selección deben someterse a un año de entrenamiento, durante el cual se les asignarán las responsabilidades técnicas o científicas que habrán de permitir el desarrollo de los programas establecidos. Los candidatos a pilotos astronautas continuarán sus actividades utilizando aviones de la NASA. La selección final llegará después del año de entrenamiento y, si un candidato es aceptado como astronauta, podrá permanecer en la NASA con un contrato laboral por una duración de cinco años.



El astronauta Guion Bluford, especialista de misión, durante el octavo vuelo del transbordador espacial estadounidense.



EN EL PRÓXIMO NÚMERO

EL SISTEMA SOLAR

CALENDARIOS ANTIGUOS

ESTRELLAS Y GALAXIAS

¿POR QUÉ DE NOCHE EL CIELO ES MÁS OSCURO?

GUÍA DE LAS CONSTELACIONES

TAURO

LA EXPLORACIÓN DEL ESPACIO

LOS LANZADORES DE EEUU

EL USO DEL ESPACIO

ESPAÑA Y EL ESPACIO

